ORSAY
n° d'ordre : 3200

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée

pour obtenir

le TITRE de DOCTEUR 3e CYCLE

par

ROMEYER-DHERBEY Jacques

APPLICATION DE METHODES RADIOACTIVES A L'INSTRUMENTATION DES REACTEURS A EAU SOUS PRESSION

Soutenue le 20 avril 1982 devant la Commission d'Examen

MM. JEAN Président
BERNARD
CHABRILLAC
DARROUZET
VIDAL.

ORSAY
n° d'ordre : 3200

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

T H E S E

présentée

pour obtenir

le TITRE de DOCTEUR 3e CYCLE

par

ROMEYER-DHERBEY Jacques

APPLICATION DE METHODES RADIOACTIVES A L'INSTRUMENTATION DES REACTEURS A EAU SOUS PRESSION

Soutenue le 20 avril 1982 devant la Commission d'Examen

MM.	JEAN	Président
	BERNARD	
	CHABRILLAC	
	DARROUZET	
	VIDAL	

UNIV.
LEIDEN
BIB.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé au Laboratoire de physique des réacteurs à eau du service d'Etudes Nucléaires de Cadarache.

Je prie Monsieur JEAN, Professeur à Paris XI, de bien vouloir accepter mes remerciements pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de cette thèse.

J'adresse mes remerciements à Monsieur VIDAL, Chef de Département au C.E.A, pour bien avoir voulu assurer la direction de cette thèse, ainsi qu'à Monsieur CHABRILLAC, Chef de Division à FRAMATOME, qui a accepté de faire partie du jury.

Que Monsieur CLOUET D'ORVAL, Chef du Département des Réacteurs à Eau trouve ici l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur BOUCHARD, Chef du Service d'Etudes Nucléaires pour avoir accepté de m'accueillir dans son service. Je remercie tout particulièrement Monsieur DARROUZET, Chef du Laboratoire de physique des réacteurs à eau, pour son accueil au sein de son Laboratoire.

Que Monsieur P. BERNARD, Ingénieur C.E.A. au Service d'Etudes Nucléaires de Cadarache, veuille bien trouver ici, l'expression de ma gratitude pour les fructueuses discussions que nous avons eu ensemble.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements aux Ingénieurs et Techniciens qui ont participé à cette étude, en particulier à Messieurs CLOUE, FACHERIS et LAGARDE qui m'ont apporté leur précieuse collaboration dans la partie expérimentale de ce travail, ainsi qu'à Messieurs J. CRAY et B. PAPIN.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547311_0001

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1ERE PARTIE - MESURES DES CARACTERISTIQUES DES FLUIDES

PAGES

I - PRESENTATION GENERALE D'UN REACTEUR A EAU SOUS PRESSION 5
I.1 Description du circuit primaire 6
I.2 Problèmes rencontrés suivant le type de fonctionnement 8

II - LES METHODES EXPERIMENTALES N'UTILISANT PAS LES PHENOMENES RADIOACTIFS 10
II.1 Mesures par ΔP 11
II.2 Techniques électriques 12
II.2.1 Mesures d'impédance 12
II.2.2 Anémométrie à fil chaud 14
II.3 Sonde optique 15
II.4 Microthermocouple indicateur de phase 16
II.5 Techniques acoustiques et ultrasons 16
II.5.1 Sondage échographique 17
II.5.2 Techniques acoustiques 17
II.6 Remarques 17

III- UTILISATION DE RAYONNEMENTS 18
III.1 Rayons X et γ 19

PAGES

III.1.1 Mesure de l'atténuation du faisceau incident 19
a) Principe de la méthode 19
b) Application aux mesures de densité et de taux de vide 22
c) Application à une mesure de niveau 25
d) Sources d'erreurs 25

III.1.2 Diffusion de gamma 36

III.2 Utilisation de neutrons 37
III.2.1 Atténuation du faisceau transmis sous choc ... 37
III.2.1.1 Principe 37
III.2.1.2 Choix de l'énergie de la source 38
III.2.2 Détection des neutrons diffusés 39

IV - CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE 41

- Références 42

2EME PARTIE - MESURE DE TEMPERATURE ET DE DEBIT DANS LA LIGNE D'EXPANSION DU PRESSURISEUR PAR TRANSMISSION GAMMA

PAGES

I - INTRODUCTION 48

II - MESURE DE TEMPERATURE 50
- II.1 Principe de la gamma densitométrie 50
- II.2 Sensibilité de la méthode 50
- II.3 Description du dispositif prévu sur site 51
- II.4 Modèle de calcul utilisé 52
- II.5 Taux de comptage dû à la source 52
- II.6 Taux de comptage dû aux sources parasites 52
- II.7 Estimation de la précision de la mesure de température par densité 53

III - DETERMINATION DU DEBIT 57
- III.1 Description du dispositif prévu sur site 57
- III.2 Analyse du fonctionnement en dynamique 58

IV - MESURES SUR MAQUETTE 60
- IV.1 Description du dispositif expérimental 60
- IV.2 Résultat des mesures 61

V - CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE 64

- Références 65

3EME PARTIE - MESURE DE NIVEAU PRESSURISEUR PAR TRANSMISSION DE RAYONNEMENTS

PAGES

I - INTRODUCTION 67

II - PRINCIPE DE LA MESURE DU NIVEAU 68

III- TRANSMISSION DE GAMMA 69
- III.1 Description du montage 69
- III.2 Modèle de calcul 69
- III.3 Flux dû à la source 70
- III.4 Sources parasites 70
- III.5 Estimation de la précision de la méthode 73
  - III.5.1 Erreur statistique 73
  - III.5.2 Erreur sur l'estimation de ρ_ℓ et de ρ_v 75
  - III.5.3 Erreur liée à l'espacement des détecteurs ... 75
  - III.5.4 Erreur sur les cotes physiques de l'installation 76
  - III.5.5 Dérive, hystérésis 76
  - III.5.6 Mesure du niveau pendant un transitoire 76
- III.6 Détection de fuites 77
- III.7 Remarques sur la transmission de neutrons 79

IV - CONCLUSION DE LA 3EME PARTIE 80

- Références 81

4EME PARTIE - MESURE DE LA MASSE D'EAU DANS LA CUVE, APRES ARRET DU REACTEUR, PAR DETECTION DES GAMMA EMIS PAR LE COMBUSTIBLE

PAGES

I - INTRODUCTION 83

II - NIVEAU CUVE ET CONDITIONS DIPHASIQUES 83
II.1 Description qualitative du phénomène 83
II.2 Méthodes envisageables pour détecter des conditions diphasiques dans la cuve du réacteur 84

III- PRINCIPE DE LA METHODE GAMMA 88

IV - CALCUL DES DIFFERENTES CONTRIBUTIONS AU FLUX APRES ARRET DU REACTEUR 90
IV.1 Modèle de calcul 90
IV.2 Modélisation de la géométrie du réacteur 90
IV.3 Flux sans choc dû aux produits de fission du coeur .. 91
IV.4 Flux sans choc dû aux produits de corrosion 96
IV.5 Activation des structures 96
IV.6 Contamination de l'eau primaire par des ruptures de gaines 97

V - AZOTE 16 99

VI - STRUCTURES SITUEES AU DESSUS DE LA CUVE 100

VII- ANALYSE DES RESULTATS 101
VII.1 Contribution des différentes sources 101
VII.2 Discussion 102
VII.3 Estimation de la précision de la méthode 104

VIII CONCLUSION DE LA 4EME PARTIE 106
- Références 107

5EME PARTIE - MESURE DU TAUX DE VIDE DANS UNE BRANCHE CHAUDE PAR TRANSMISSION DE GAMMA

PAGES

I - INTRODUCTION 110

II - PRINCIPE DE LA METHODE 111
II.1 Expression du signal du détecteur 112
II.2 Application aux conditions de la mesure du taux de vide branche chaude 113

II.2.1 Taux de comptage 113
II.2.2 Sensibilité de la méthode en l'absence de sources parasites 114
II.2.3 Sources parasites 115
II.2.4 Evaluation de l'activité des différentes sources 115
II.2.5 Calcul de l'influence des diverses sources parasites au niveau du détecteur 117

II.3 Modulation de source 121

III- DISPOSITIF ENVISAGE 123
III.1 Description 123
III.2 Points particuliers 124

IV CONCLUSION DE LA 5EME PARTIE 125

- Références 126
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 127
- Annexe 1 : Activité γ du circuit primaire 129
- Annexe 2 : Modulation de source 133
- Références sur l'Annexe 2 137
FIGURES 138

INTRODUCTION

L'utilisation de méthode radioactives permet ou peut permettre d'obtenir des informations très utiles - sans nécessiter d'intervenir sur les structures - sur les caractéristiques du fluide de refroidissement dans les réacteurs de puissance à eau sous pression (PWR), et de ce fait apporter une aide au fonctionnement ou à la sûreté de ces réacteurs.

Ces méthodes sont basées sur la variation de l'interaction des gamma ou des neutrons avec la variation de densité apparente du fluide.

Pour fournir une information sur les conditions du fluide, les critères guidant le choix d'une méthode peuvent se résumer ainsi :

- Caractéristiques de l'enceinte (dimensions, nature, épaisseur des parois) contenant le fluide :
  Celles-ci dépendent de la température et pression du fluide mais aussi des conditions d'utilisation (contraintes thermiques, fatigue mécanique ....).

- Caractéristiques du fluide (eau, vapeur, mélange diphasique) et vitesse d'écoulement ou stratification.

- Temps de réponse du système de mesure.

- Précision, résolution du système de mesure.
  Celles-ci dépendent fortement des conditions ambiantes (présence d'activité ...) et de la durée des mesures.

Compte tenu de ces critères, la plus grande partie des méthodes utilisées en Laboratoire basées sur les propriétés électriques, optiques, acoustiques, sont difficilement applicables ou même impossibles.

Les méthodes radioactives peuvent être utilisées pour différents objectifs.

- Ponctuellement dans le temps pour mesurer un phénomène ou pour étalonner d'autres méthodes.

- En continu, en fonctionnement normal ou même en fonctionnement accidentel.

Ces méthodes peuvent nécessiter l'utilisation de sources extérieures au système (méthodes actives) ou de sources propres au système (méthodes passives).

Dans la première partie, après une rapide description des caractéristiques des réacteurs PWR, nous rappelerons différentes méthodes permettant de déterminer l'état du fluide dans un réacteur, ou des boucles à eau ou eau vapeur. (Mesures de pression, mesures de température, mesure de densité par méthode électrique, optique ....). Nous présenterons plus particulièrement les méthodes radioactives (transmission de gamma et de neutrons).

Dans les quatre parties suivantes, nous donnons des applications des méthodes utilisant la transmission de particules énergétiques et répondant à des problèmes précis.

Certaines d'entre elles sont déjà en cours de réalisation ou en projet, d'autres ne sont que des études théoriques et n'ont pas encore d'applications.

Ainsi, la deuxième partie est consacrée à l'étude d'une méthode par transmission de gamma, permettant de caractériser expérimentalement les débits et les variations de température de l'eau dans la ligne d'expansion du pressuriseur ; des expériences réalisées pour valider la méthode sont présentées.

Ces mesures sont effectuées pour préciser les calculs des contraintes thermiques et de la fatigue du métal dans la ligne d'expansion du pressuriseur.

L'étude théorique d'une méthode permettant de déterminer le niveau dans le pressuriseur par transmission de gamma ou de neutrons, applicable en continu, en fonctionnement normal ou accidentel, est présentée dans la troisième partie.

Les deux dernières applications concernent des mesures en cas de fonctionnement accidentel du réacteur.

Dans la quatrième partie, nous présentons l'étude théorique d'une méthode, permettant d'estimer la masse d'eau contenue dans la cuve, après arrêt du réacteur, en cas d'accident, par comptage des gamma émis par le combustible.

Nous présentons l'étude théorique d'une méthode, dans la dernière partie, permettant d'estimer le taux de vide dans une branche chaude, par transmission de gamma.

1ère P A R T I E :

MESURES DES CARACTERISTIQUES DES FLUIDES

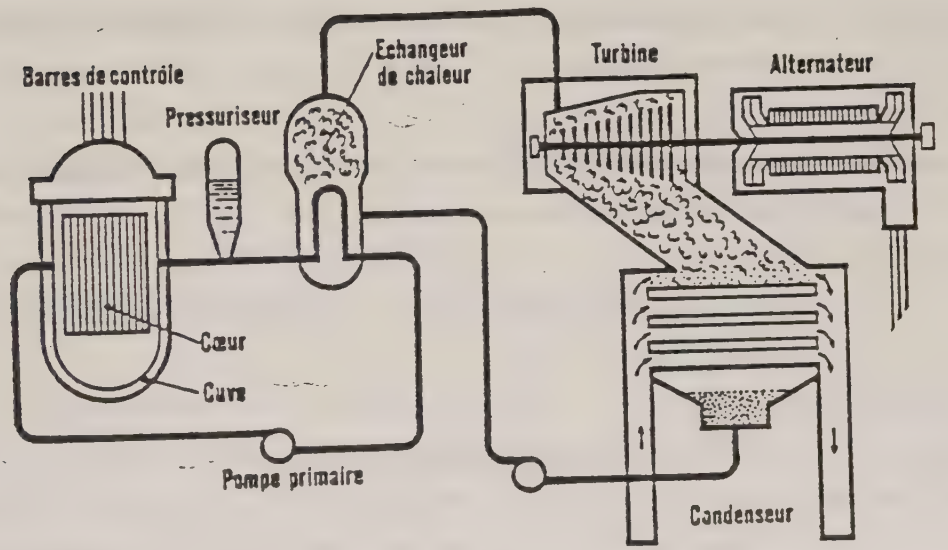
I. PRESENTATION GENERALE D'UN REACTEUR A EAU SOUS PRESSION (PWR)

Une centrale nucléaire à eau sous pression se compose de deux circuits d'eau séparés.

Le circuit primaire comprend le réacteur nucléaire proprement dit, qui permet de chauffer le fluide, des tuyauteries permettant de transférer la chaleur jusqu'à un échangeur de vapeur, des tuyauteries de retour avec pompe permettant de réinjecter l'eau dans le coeur, un pressuriseur et des circuits annexes.

Le circuit secondaire comprend essentiellement une arrivée d'eau froide qui se transforme en vapeur et permet d'alimenter des turbines pour la production d'énergie électrique. Ce circuit est fermé grâce à un condenseur.

SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE
AVEC REACTEUR A URANIUM ENRICHI ET EAU SOUS PRESSION
(PWR)



Nous allons décrire plus précisemment le circuit primaire et les problèmes pouvant se rencontrer en fonctionnement normal ou accidentel.

Pour une description plus détaillée du fonctionnement on pourra se reporter en particulier à la référence /29/.

I.1 Description du circuit primaire

I.1.1 La cuve et les équipements internes (Figure 1)

La cuve est la pièce principale du circuit primaire. C'est une enceinte de pression en acier constituée d'une bride permettant le raccord avec le couvercle, de viroles dont une porte les ajutages d'entrée et de sortie d'eau primaire, et d'un fond hémisphérique. La cuve est fermée par un couvercle hémisphérique, de 18 cm d'épaisseur.

Le couvercle est muni de 65 manchettes pour l'adaptation des mécanismes des grappes de contrôle et des colonnes thermocouples. Seuls 53 de ces emplacements sont occupés.

Les équipements internes comprennent notamment :

. L'enveloppe de coeur, assurant la séparation entre le fluide froid pénétrant dans la cuve et le fluide chaud sortant du coeur, et faisant fonction de panier support du coeur.

. La plaque inférieure de coeur sur laquelle reposent les assemblages combustibles.

. La plaque supérieure de coeur, qui immobilise les assemblages combustibles.

. Les tubes guides pour les grappes de contrôle dans la partie supérieure.

I.1.2 Les boucles primaires

L'eau du circuit primaire, mue par des pompes, traverse le coeur ou elle s'échauffe et cède son énergie dans les générateurs de vapeur. Une boucle est composée d'une tuyauterie conduisant l'eau du coeur au générateur avec tuyauterie de retour sur laquelle est située la pompe. Les boucles primaires sont au nombre de 3 pour un PWR de 900 MWE.

Il est à noter que les tuyauteries primaires ont un diamètre d'environ 700 mm et une épaisseur de 60 à 85 mm. La vitesse de circulation de l'eau y est de 16 m/s.

I.1.3 Le pressuriseur (Figure 17)

Le pressuriseur est un appareil qui permet de maintenir la pression du circuit primaire à sa valeur de consigne, en particulier lors de transitoires.

Une pressuriseur est une enceinte cylindrique terminée par deux fonds hémisphériques, d'une hauteur de 12 m et d'un diamètre de 2.1 m. Le volume utile est de 40 m^3.

A l'intérieur de cette enceinte, se trouve de l'eau (24 m^3 dans les conditions nominales), surmontée d'un matelas de vapeur. L'eau est reliée par la ligne d'expansion à la branche chaude d'une des boucles primaires.

A l'intérieur du pressuriseur, l'eau et la vapeur se trouvent à l'équilibre thermodynamique, à une température égale à la température de saturation correspondant à la pression nominale du circuit primaire (Tsat (155 bars) = 345°C).

Pour faire varier la pression à l'intérieur du pressuriseur et donc à l'intérieur du circuit primaire, il suffit de faire varier l'importance du matelas de vapeur, soit en vaporisant de l'eau en mettant en service des résistances chauffantes disposées dans le liquide pour augmenter la pression, soit en condensant la vapeur par aspersion d'eau froide prélevée sur la branche froide d'une des boucles primaires pour faire baisser la pression.

Le pressuriseur a un deuxième rôle : il agit comme tampon pour amortir les variations de volume de l'eau primaire, une variation du volume de l'eau primaire entraînant une variation du niveau de l'eau du pressuriseur.

Le niveau d'eau dans le pressuriseur est asservi à la puissance de manière à compenser les variations de la densité avec la température.

Suivant l'écart entre le niveau réel et le niveau de consigne, on met en service le circuit de décharge du pressuriseur ou au contraire on augmente le débit de charge du système de contrôle volumétrique et chimique, par une liaison située dans la partie supérieure du pressuriseur.

I.2 Problèmes rencontrés suivant le type de fonctionnement

En fonctionnement normal, le fluide est sous forme monophasique dans tout le circuit primaire excepté au niveau du pressuriseur.

Les caractéristiques du fluide peuvent être contrôlées à partir de la connaissance de la pression au niveau du pressuriseur, des pertes de charges, de la production de chaleur dans le coeur, des échanges dans les générateurs de vapeur, etc ...

Le contrôle de la température est effectué en différents points du circuit par des thermocouples ou des sondes.

En fonctionnement normal plusieurs problèmes se posent : d'abord au niveau pressuriseur pour connaître le niveau de séparation entre phase liquide et la phase vapeur ; ensuite dans les parties du circuit qui peuvent être soumises à des variations brutales de température, en particulier ce problème concerne la ligne d'expansion qui relie le pressuriseur à la branche chaude.

Dans le cas d'accident (surpuissance, dépressurisation, etc ...) il peut se former en divers points du circuit de la vapeur pouvant provoquer l'assèchement des générateurs de vapeur ou du coeur et conduire à des accidents graves.

Nous allons préciser certains de ces points.

a) Ligne d'expansion du pressuriseur

Comme nous l'avons vu précédemment, la ligne d'expansion du pressuriseur sert de liaison entre deux zones du circuit primaire à des températures différentes ; le pressuriseur à 345°C, et la branche chaude à 286°C en arrêt chaud ou à 326°C à pleine puissance.

Les transitoires peuvent faire apparaître dans la ligne un front thermique, qui entraîne une fatigue de la ligne pouvant provoquer une rupture.

Il est nécessaire de connaître la vitesse de propagations de ce front, sa fréquence d'apparition et les variations de température, afin d'estimer précisemment les contraintes thermiques supportées par la ligne.

b) Niveau et masse d'eau dans le pressuriseur

Le niveau d'eau dans le pressuriseur conditionne les régulations ; il doit rester situé dans une zone. En effet, il est nécessaire, d'une part d'éviter que le pressuriseur soit totalement rempli d'eau afin qu'il puisse supporter les variations de masse volumique du primaire, et d'autre part que les chaufferettes soient découvertes.

En cas de dépressurisation, le pressuriseur peut bouillir en masse, il n'y a pas d'interface liquide-vapeur nettement définie.

Il est nécessaire, pour ces configurations diphasiques particulières, que l'instrumentation mesurant le niveau détecte ces cas particuliers de fonctionnement et ne donne pas une indication érronée du niveau mais une estimation de la masse d'eau réelle contenue dans le pressuriseur.

c) Niveau d'eau dans la cuve et taux de vide dans les branches chaudes

Toujours dans le cas d'une dépressurisation, des conditions diphasiques peuvent apparaître dans les parties les plus chaudes du circuit primaire. Des bulles de vapeur peuvent se former au dessus du coeur, dans le dome ou sous les structures, et interrompre la circulation naturelle dans les branches chaudes.

Le phénomène s'aggravant, le coeur peut être dénoyé.

Il est important de pouvoir détecter si une bulle se forme au-dessus du coeur et si les tuyauteries commencent à être dénoyées.

Dans le chapitre suivant, nous présentons quelques méthodes pouvant permettre de détecter les points énumérés ci-dessus.

II. LES METHODES EXPERIMENTALES N'UTILISANT PAS LES PHENOMENES RADIOACTIFS

Différentes méthodes expérimentales, développées sur boucles ou sur réacteurs, permettent des mesures de densité d'eau, de taux de vide ou de niveau eau/vapeur.

Ces mesures sont généralement basées sur la détermination de l'état du fluide (mesures de pression, de température) ou permettent de déterminer des taux de vide, densités, d'après les propriétés différentes de l'eau et de la vapeur.

Elles reposent sur :

- Les propriétés électriques.
  (résistivité, conductivité).

- La transmission de la lumière.

- La vitesse du son.

- L'absorption ou la diffusion des particules énergétiques qui, compte tenu de l'épaisseur des parois dans un PWR, se limitent aux neutrons et aux gamma.

Ces méthodes permettent des mesures locales ou globales.

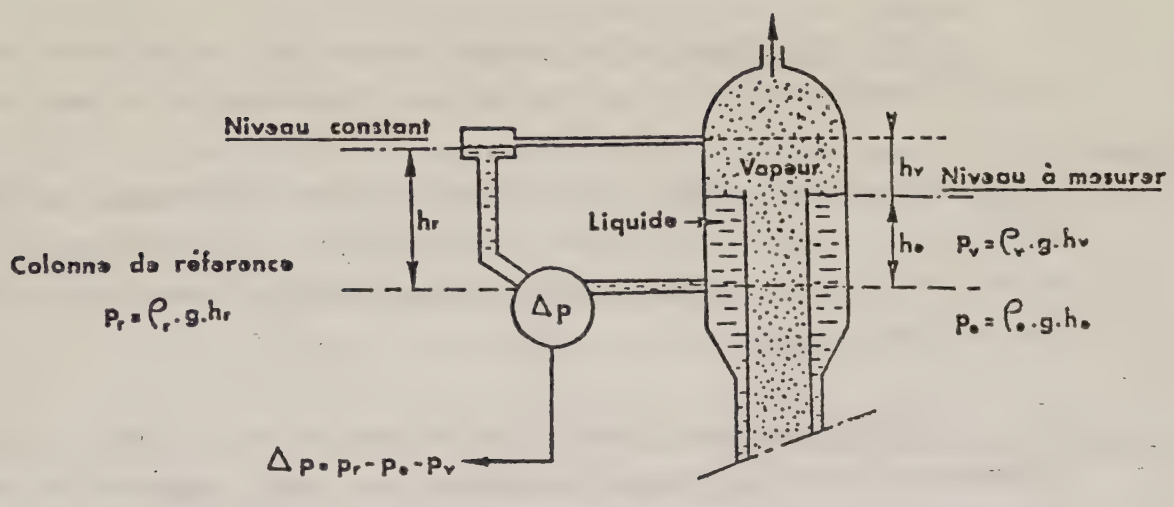
Un certain nombre d'entre elles ont été appliquées sur des boucles ou même sur des réacteurs.

Nous les rappelerons brièvement, en insistant particulièrement sur les méthodes radioactives, en indiquant, selon nous, leurs avantages et inconvénients.

Une documentation détaillée sur les méthodes de mesures en écoulements diphasiques est proposée par Hewitt (/14/ et /15/).

II.1. MESURES PAR ΔP

Ces mesures permettent de déterminer un niveau d'eau. Pour les PWR, elles sont faites à partir de mesures différentielles de pression représentant la différence de poids de deux colonnes d'eau, l'une étant de hauteur constante (colonne de référence), l'autre de hauteur variable (niveau que l'on veut mesurer).



Dans cette mesure, on voit que le ΔP mesuré dépend du niveau d'eau mais aussi de la masse volumique du liquide et de la vapeur d'eau.

$$\Delta P = g (\rho_r h_r - \rho_\ell h_\ell - \rho_v h_v)$$
$$= g (\rho_r - \rho_v) hr - (\rho_\ell - \rho_v) h_\ell)$$

h_ℓ est le niveau n que l'on mesure.

La mesure effectuée est de la forme $\Delta P = A - B.n$ ou A et B sont des coefficients qui dépendent des masses volumiques de l'eau et de la vapeur.

Ces mesures posent parfois des problèmes de représentativité (dérives, hysteresis, inaptitude à déceler d'éventuelles conditions diphasiques).

II.2. TECHNIQUES ELECTRIQUES

Les techniques électriques se divisent en deux catégories :

- Les mesures d'impédance,
- L'anémométrie à fil ou à film chaud.

II.2.1 Mesures d'impédance

Pour ces mesures, on peut accéder à un taux de vide global dans un volume ou local en un point /1/.

Le principe d'une telle mesure repose sur la relation existant entre l'impédance électrique d'un mélange diphasique et le taux de vide.

Une description détaillée de cette méthode est donnée par ORBRECK (/2/) qui a testé différentes configurations d'électrodes et aussi étudié les erreurs causées par les changements de forme de la distribution de taux de vide.

La constante diélectrique ε et la résistivité ρ sont en général différentes entre la phase liquide et la phase vapeur d'un mélange diphasique ; c'est particulièrement vrai pour les mélanges eau-vapeur d'eau.

On peut représenter le circuit électrique équivalent d'un écoulement diphasique pris entre deux électrodes par une résistance R en parallèle avec une capacité C. L'impédance du circuit s'exprime alors par :

$$Z(w) = \frac{1}{\frac{1}{R} + jwC}$$

où $w = 2 \pi n$, n étant la fréquence du courant appliqué aux électrodes.

Deux possibilités de mesure sont alors possible suivant la fréquence d'utilisation :

- Si $RCw \gg 1$ $Z = \frac{1}{Cw}$; on est alors ramené à une mesure de capacité.

- Si $RCw \ll 1$ $Z = R$; on est alors ramené à une mesure de résistance.

La capacité C est proportionnelle à la constante diélectrique moyenne $\bar{\varepsilon}$, qui est elle même reliée au taux de vide moyen par la relation $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_\ell (1 - \alpha) + \varepsilon_v . \alpha$

où ε_ℓ est la constante diélectrique du liquide
ε_v est la constante diélectrique de la vapeur

De même, la résistance R est proportionnelle à la résistivité moyenne $\bar{\rho}$. $\bar{\rho} = \rho_\ell (1 - \alpha) + \rho_v \alpha$.

où ρ_ℓ est la résistivité du liquide
ρ_v est la résisitivité de la vapeur.

Les limitations de cette méthode sont dues à la décroissance rapide de ε_ℓ ou ρ_ℓ en fonction de la température.

La méthode de mesure par capacité est la plus couramment utilisée car ρ_ℓ est très sensible à la concentration en ions de la phase liquide. Des erreurs peuvent être commises dans le cas d'un écoulement annulaire.

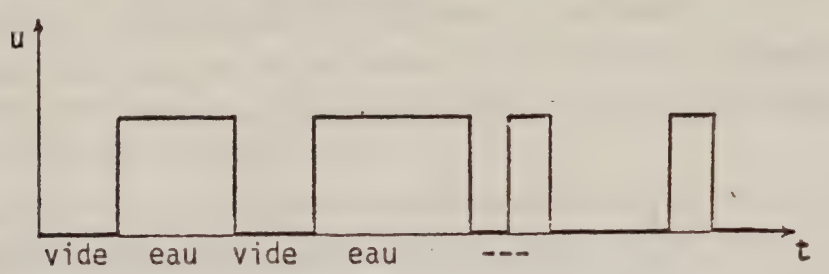
CIMORELLI et PREMOLI (/1/) ont utilisé cette méthode pour mesurer le taux de vide dans une section-test annulaire en ébullition sous-saturée.

Le principal avantage de cette méthode est sa réponse rapide aux variations du taux de vide. Pour cette raison elle a été utilisée extensivement pour des mesures en dynamique.

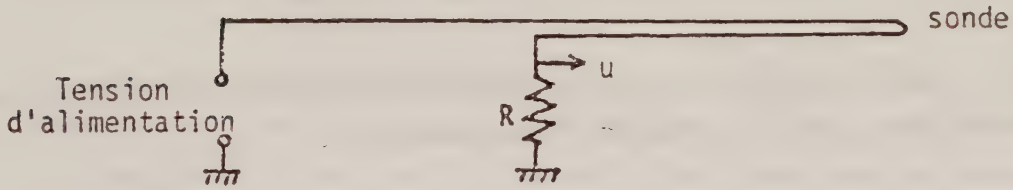
Ce type d'application est reporté en particulier, par Nylund et Al. (/3/).

Sur le même principe, une sonde résistive locale permet de détecter la présence ou l'absence de vide en un point M de l'écoulement.

Le traitement des signaux délivrés par la sonde, effectué en "tout ou rien" permet d'accéder directement à la variable caractéristique de la phase X (M,t). Par exemple, pour un mode d'alimentation en continu, on obtient une réponse en crénau d'allure suivante.



La tension u est prélevée aux bornes d'une résistance R suivant le schéma électrique suivant.



Ce dispositif simple se heurte à une complication importante à cause de phénomènes électrochimiques, difficiles à éliminer, pouvant entraîner une détérioration prématurée de la sonde (/7/).

II.2.2 Anémométrie à fil chaud

Une couche métallique mince déposée à la surface d'un support isolant et elle même isolée du fluide ambiant est chauffée par effet Joule.

Suivant la vitesse et la nature de la phase en présence, l'énergie thermique transférée au fluide varie, et la température et la résistance de la sonde sont modifiées. De même que pour la sonde résistive, on peut accéder à la variable caractéristique de la phase. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir être utilisée quelle que soit la conductivité électrique du fluide environnant la sonde. Cependant, le signal enregistré est difficile à interpréter, notamment lors du passage des interfaces /10/.

II.3. SONDE OPTIQUE

La sonde optique remplace la sonde résistive dans les écoulements disphasiques où le liquide n'est pas conducteur.

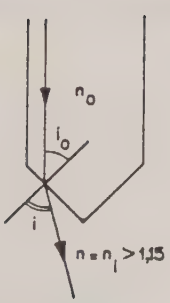
Son fonctionnement repose sur le phénomène de la réflexion totale.

Considérons un prisme d'angle au sommet 90°, d'indice no, et plongé dans un milieu d'indice n. La loi de Descartes indique que, entre les angles d'incidence et d'émergence, il existe la relation :

$$no \sin io = n \sin i$$

Il faut évidemment satisfaire :

$$\sin i = \frac{no}{n} \sin io < 1$$



A_ Réfraction

B_ Réflexion totale

Si le prisme est en verre (no = 1.62) et io = 45° il y aura réfraction uniquement lorsque n sera supérieur à 1.15 et réflexion totale dans l'autre cas. Suivant que la pointe de la sonde est entourée de vide (nv = 1.00) ou d'eau (nℓ = 1.33), le rayon lumineux incident sera totalement réflêchi ou transmis dans le liquide.

Comme pour les sondes résistives, les signaux réels sont déformés par rapport aux signaux théoriques, cela étant dû à des phénomènes hydrodynamiques et optiques. On utilise généralement un circuit à seuil ou une analyse statistique de l'amplitude (/8/, /9/).

Cependant, cette méthode semble mal adaptée àux écoulements sous fortes pressions, et à débits élevés, et ne donne qu'une information locale.

II.4. MICROTHERMOCOUPLE INDICATEUR DE PHASE

Ce dispositif combine le microthermocouple et le principe des sondes résistives.

La partie active du thermocouple est constituée de deux fils chromel-alumel de 20 µm de diamètre. Le thermocouple est isolé électriquement du fluide environnant, sauf la soudure chaude.

Le traitement du signal de température (donné par le thermocouple) et du signal de phase (donné par la sonde résistive) permet de mesurer : (/11/, /12/)

- Le taux de présence local.
- La température locale du liquide.
- La température locale de la vapeur.

II.5. TECHNIQUES ACOUSTIQUES ET ULTRASONS

Elles se divisent en deux catégories : Le sondage échographique et les techniques acoustiques. En cours de développement, ces techniques ne sont pas encore adaptées aux fortes pressions.

II.5.1. Sondage échographique

Cette technique repose sur le principe de Sonar. Une onde ultrasonore possède la propriété de se réflêchir à l'interface de deux milieux d'impédances acoustiques différentes. Les échos provenant des surfaces rencontrées reviennent au transducteur émetteur de l'onde avec un retard par rapport à l'émission, qui est d'autant plus grand que la surface réfléchissante est éloignée de la sonde. Le transducteur est alors utilisé comme récepteur, et les échos sont transformés en signaux électriques. Cette technique permet de détecter actuellement la localisation et la taille de bulles de vapeur /5/.

II.5.2. Techniques acoustiques

La vitesse du son dans un mélange double phase est fortement dépendante du taux de vide.

Ainsi, certains auteurs ont proposé de déterminer le taux de vide à partir des variations de la vitesse du son dans un écoulement (/13/). Cette technique est très limitée par le fait que la vitesse du son est une fonction complexe, non seulement du taux de vide, mais en outre de la structure de l'écoulement, de la fréquence du son, et des conditions de température et de pression.

II.6. REMARQUES

Pour le fonctionnement normal, ou en cas d'accident, il est souhaitable ou même nécessaire de disposer de méthodes de mesures fiables, pouvant être adaptées dans certains cas sur les centrales actuelles.

Les besoins exprimés dans le premier paragraphe montrent que l'on ne s'intéresse pas à des phénomènes locaux mais à des phénomènes "globaux".

D'autre part, les méthodes intrusives sont beaucoup plus délicates à mettre en oeuvre car elles nécessitent des ouvertures dans les circuits.

Il est donc évident que les méthodes décrites précédemment ne peuvent répondre de façon satisfaisante aux problèmes posés.

C'est pour ces raisons que nous avons cherché d'autres possibilités.

Dans le chapitre suivant, nous examinerons les méthodes basées sur l'utilisation des rayons γ ou X ou sur l'utilisation des neutrons.

III. UTILISATION DE RAYONNEMENTS

De nombreux travaux ont été consacrés aux techniques d'absorption de rayonnements et leur application à l'étude d'écoulements diphasiques.

La majorité des expériences a été réalisée sur des boucles d'essai, pour des mesures de taux de vide, sur des canalisations de diamètres et d'épaisseur de paroi faibles en comparaison des dimensions types des tuyauteries du circuit primaire d'un PWR.

Ce sont des méthodes très intéressantes car les mesures se font sans perturber l'écoulement, et ne nécessitent pas d'intervenir sur les structures, mais par contre, comme toutes méthodes, elles présentent certains inconvénients.

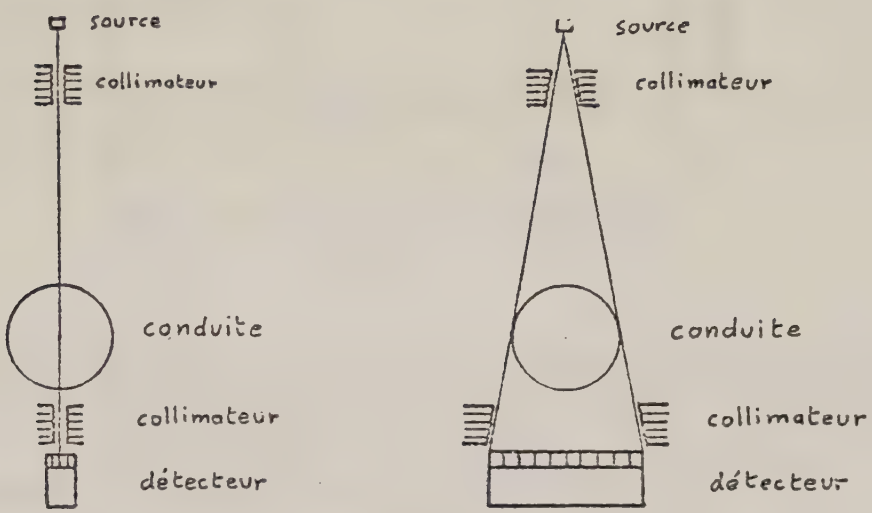
Le chapitre suivant est consacré principalement à la méthode utilisant la transmission γ, car c'est la méthode qui a les applications les plus prometteuses.

Nous dirons cependant un mot sur les méthodes utilisant la diffusion ou sur les méthodes se servant des neutrons.

III.1 Rayons X et γ

III.1.1 Mesure de l'atténuation du faisceau incident

Par la mesure de l'atténuation d'un faisceau X ou γ après traversée d'un milieu, on peut déterminer la densité moyenne (ou le taux de vide) le long d'une corde ou sur une section droite. La connaissance de la densité du liquide et de la vapeur permet de déterminer la distance parcourue par le faisceau dans le liquide et de déterminer un niveau.



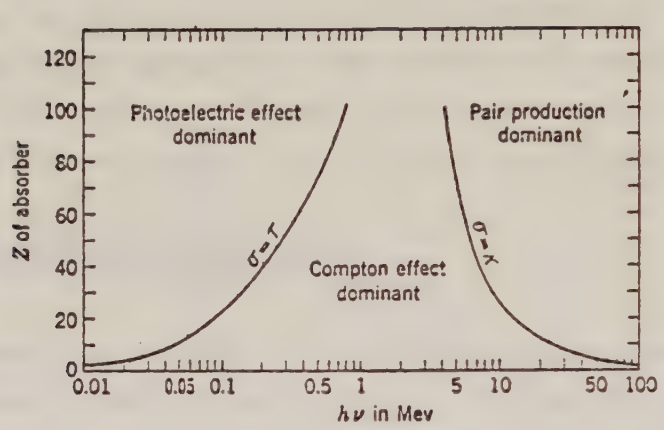
a) Principe de la méthode

Une source de rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, soigneusement collimatée, émet un faisceau de photons d'intensité Io.

Après traversée du milieu, on mesure une intensité transmise I.

Une partie du faisceau issu de la source a été absorbée ou diffusée par le milieu interposé.

Les principaux processus responsables de cette atténuation sont l'effet photoélectrique, la diffusion compton et la production de paires électron-positon par matérialisation de photons, chaque processus se définissant par un coefficient d'atténuation. L'importance relative de ces effets est montrée sur la figure ci-dessous.



Importance relative des 3 types principaux d'interaction γ.

La ligne montre les valeurs de Z et de hν ou les effets voisins sont égaux.

L'effet photoélectrique est important pour des énergies faibles et des matériaux de Z élevés.

La production de paires est d'importance majeure pour des énergies et des Z élevés.

L'effet compton prédomine dans un domaine d'énergie intermédiaire, quel que soit Z.

C'est cet effet qui interviendra principalement dans les études nous concernant.

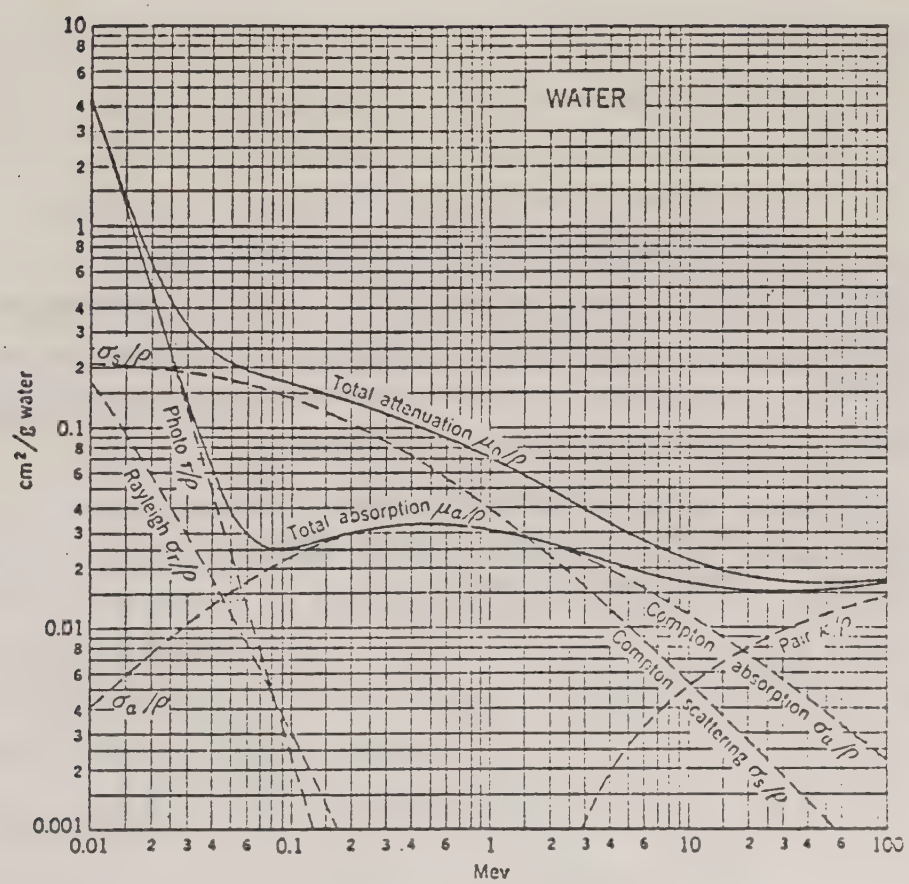
D'un point de vue macroscopique, l'ensemble de ces processus d'aborption s'intègre dans un coefficient d'absorption μ (E) ; on montre alors que pour un milieu homogène, de masse volumique ρ, et d'épaisseur x, l'intensité émergente s'écrit :

$$I(E) = Io(E)\, e^{-\sigma(E).\rho.x}$$

ou $\sigma(E) = \frac{\mu(E)}{\rho}$ est le coefficient d'absorption massique (en $cm^2\ g^{-1}$) du corps traversé.

Ce coefficient $\sigma(E)$ ne dépend pas de l'état physique (liquide ou vapeur) de l'absorbant.

La figure ci-dessous montre la valeur de σ, pour l'eau, en fonction de l'énergie.



Coefficients d'atténuation massiques pour les photons dans l'eau.

La courbe "total absorption" est $\left(\frac{\mu a}{\rho}\right) = \left(\frac{\sigma a}{\rho}\right) + \left(\frac{\tau}{\rho}\right) + \left(\frac{K}{\rho}\right)$, ou σ_a, τ et K sont les coefficients linéaires pour l'absorption compton, l'effet photoélectrique, et la production de paires. Quand le coefficient de diffusion compton est ajouté à μ_a, on obtient la courbe marquée "total atténuation" qui est $\left(\frac{\mu o}{\rho}\right) = \frac{\mu a}{\rho} + \left(\frac{\sigma s}{\rho}\right)$.

La section efficace totale de diffusion Rayleigh $\left(\frac{\sigma r}{\rho}\right)$ est montrée séparément. Comme la diffusion Rayleigh est élastique et est confinée aux angles faibles, elle n'a pas été inclue dans $\frac{\mu o}{\rho}$.

Des tables donnant les valeurs de ce coefficient pour différents matériaux ont été donnés, en particulier par Storm et Israel (1970) /26/.

b) Application aux mesures de densité et de taux de vide

Pour une canalisation contenant un fluide, nous pouvons utiliser la formule précédente.

Si nous notons :

E	L'énergie des photons émis par la source,
T	La température des milieux traversés,
ep(T)	L'épaisseur des parois et L(T) la distance entre les parois,
$\sigma(E)$	Le coefficient d'atténuation massique pour le liquide,
$\sigma p(E)$	Le coefficient d'atténuation massique pour la paroi,
$\rho(T)$	La densité locale du fluide,
$\rho_p(T)$	La densité moyenne de la paroi,
S(t)	Nombre de γ émis par la source,
$\varepsilon(E)$	Rendement du détecteur,

Nous avons :

$$I(E, T, t) = Io(E, t) \exp\left(-2\int_o^{ep(T)} \sigma p(E)\, \rho_p(y)dy\right) \times \exp\left(-\int_o^{L(T)} \sigma(E)\, \rho(T)\, dy\right) \qquad (1)$$

Pour une source ponctuelle isotope mono-énergétique, située à une distance D du détecteur, le flux dû aux γ n'ayant pas subi de choc, au niveau du détecteur sera I (E, T, t), avec

$$Io\ (E,\ t) = \frac{S(t)}{4\pi D^2}\ \times \varepsilon(t)$$

En effectuant une mesure, le fluide ayant une densité ρ_{N1} déterminée, alors

$$I_{N1} = Io \exp.\ (-\ 2\ \mu p\ ep).\ \exp\ (-\ \sigma\ \rho_{N1}.L)$$

En effectuant une deuxième mesure, à une masse volumique ρ_{N2} connue, la masse volumique moyenne se définissant pour un faisceau étroit par

$$\bar{\rho} = \frac{1}{L} \int_0^L \rho(y)\ dy, \text{ est}$$

est donnée par :

$$\bar{\rho} = \frac{Log\ (I) - Log\ (I_{N1})}{Log\ (I_{N2}) - Log\ (I_{N1})}\ (\rho_{N2} - \rho_{N1}) + \rho_{N1}$$

La calibration définie ci-dessus élimine les effets d'efficacité du collimateur-détecteur, les imperfections des tubes, l'incertitude sur l'activité de la source, qui entrent dans la définition absolue de l'intensité émergente.

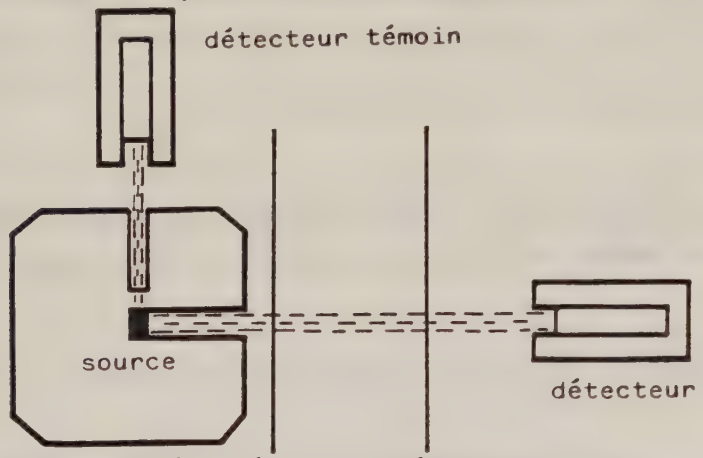
Si la calibration a été effectuée de telle façon que I_{N1} corresponde au signal du détecteur en présence de la phase liquide, I_{N2} au signal du détecteur en présence de la phase vapeur, dans des conditions proches de l'expérience, le taux de vide instantané sur un segment, défini par le rapport de la longueur occupée par la phase vapeur à la longueur totale L, sera donné par

$$R \overset{\Delta}{=} \frac{LG}{L_G + L_L} = \frac{Log\ I - Log\ I_F}{Log\ I_G - Log\ I_F}$$

Ou $\overset{\Delta}{=}$ est le symbole de définition.

De la même façon, si le faisceau n'est plus étroit mais englobe la totalité de la canalisation il est possible de mesurer le taux de vide sur une section droite défini par le rapport de la surface occupée par la phase vapeur à la surface totale.

Si l'activité de la source varie fortement au cours du temps, un second détecteur peut s'avérer nécessaire



Le signal délivré par ce détecteur sera :

$$S(t) = C \times A(t)$$

C étant une constante prenant en compte l'effet d'angle solide, l'atténuation par un absorbant, etc ...

A(t) représente l'activité de la source au temps t.

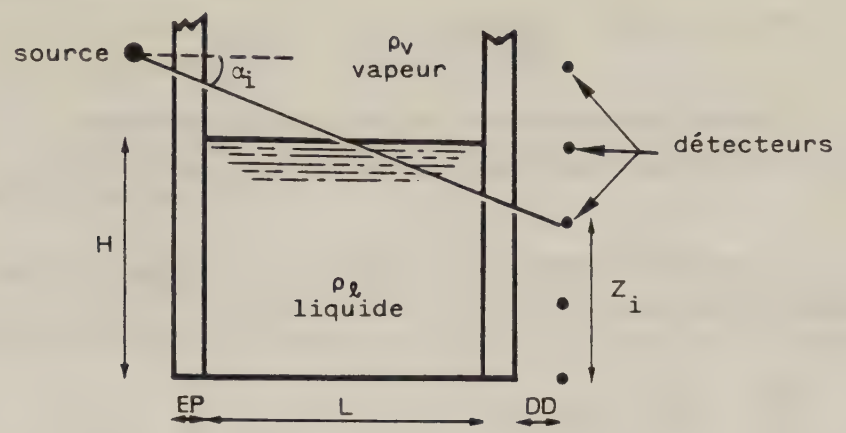
La masse volumique est alors donnée par :

$$\bar{\rho} = \frac{\text{Log} \dfrac{I(t)}{I_{N1}} \times \dfrac{So}{S(t)}}{\text{Log}I_{N2} - \text{Log}(I_{N1})} (\rho_{N2} - \rho_{N1}) + \rho_{N1}$$

Où So représente le signal délivré par le second détecteur, lors des mesures de calibration.

c) Application à une mesure de niveau

Un exemple de méthode de mesure du niveau est représenté sur la figure ci-dessous.



Le niveau est déterminé par

$$H = Z_i + L \operatorname{tg} \alpha_i \left(\frac{\langle \rho \rangle_i - \rho_v}{\rho_\ell - \rho_v} + EP + DD \right)$$

Pour un détecteur mesurant une masse volumique, selon la méthode précédente, comprise entre ρ_ℓ et ρ_v avec :

Z_i Cote du détecteur
L Diamètre
EP Epaisseur de la paroi
DD Distance du détecteur à la paroi
α_i Angle entre la source et le détecteur.

d) Sources d'erreurs

d1 Erreur statistique

Inhérente à toutes les méthodes de détection des rayonnements.

La loi d'émission d'un rayonnement est une variable aléatoire poissonienne. Quand le taux de comptage est élevé, la fonction de répartition ressemble à une gaussienne, ce qui permet de calculer des intervalles de confiance sur la base d'une loi de gauss.

Pour un niveau de confiance donné, la précision statistique relative est proportionnelle à $\frac{\sigma}{N}$ (N étant le comptage obtenu pendant la durée de la mesure).

On a donc $\frac{\Delta N}{N} = \frac{k}{\sqrt{N}}$ /28/

K étant déterminé par le niveau de confiance.
(K = 1 pour 68 % de chances, K = 3 pour 99,73%).

Si on fait apparaître le taux de comptage moyens τ et le temps de mesure on obtient :

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{K}{\sqrt{\tau}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}$$

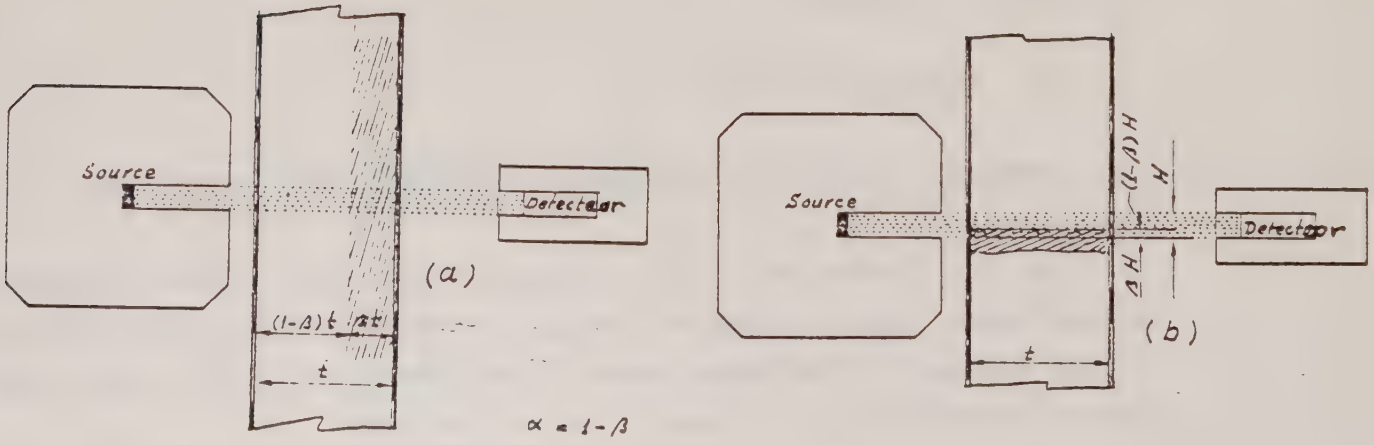
dans le cas de mesures utilisant un intégrateur, on montre que la précision statistique relative s'exprime par $\frac{\Delta N}{N} = \frac{k}{\sqrt{2\tau\theta}}$

θ étant la constante de temps d'intégration utilisée.

d2 <u>Répartition des phases</u>

Pour des mesures en écoulements diphasiques (taux de vide), le résultat de la mesure dépend de la répartition des phases.

Pour illustrer cet effet, nous pouvons considérer deux cas extrêmes.



Dans le premier cas (mode série), l'interface liquide vapeur est perpendiculaire au faisceau (schéma a).

La mesure donnera

$$\frac{I}{Io} = K\, e^{-\sigma\rho_\ell \beta X} \cdot e^{-\sigma\rho_v (1-\beta) X} \qquad (1)$$

K représentant l'atténuation par les parois, βX l'épaisseur de liquide traversée.

Dans le second cas, (mode parallèle), où l'interface liquide vapeur est orientée parallèlement au faisceau (schéma b), l'atténuation sera :

$$\frac{I}{Io} = K\left(\beta\, e^{-\sigma\rho_\ell X} + (1-\beta)\, e^{-\sigma\rho_v X}\right)$$

et donnerait une valeur erronée du taux de vide en utilisant l'équation (1).

Dans la réalité, l'écoulement diphasique aurait une configuration intermédiaire.

Un écoulement à bulles, de structure fine, serait proche d'une distribution idéale.

Un régime d'écoulement avec des interfaces parallèles au faisceau entraînerait l'erreur la plus importante si aucune correction n'est faite dans l'interprétation de la mesure.

Un moyen de réduire cette erreur, est d'utiliser un faisceau étroit, limitant la probabilité d'avoir des interfaces parallèles au faisceau (précision allant de 5 à 20 % dans les cas les plus défavorables). Un balayage de la section (système source détecteur tournant) permettant de déterminer le type de l'écoulement.

Ce balayage ne peut être effectué que pour des diamètres de tuyaux faibles, compte tenu de l'encombrement du système.

Une autre méthode est d'utiliser plusieurs détecteurs alignés sur différents faisceaux, proches les uns des autres, sur une source unique de gamma (/25/).

En particulier, H. JOHN et Al, ont mesuré des taux de vide, sur un tuyau de 50 mm de section, à l'aide d'un système à 5 faisceaux, permettant de déterminer le type de l'écoulement (/24/).

Le choix de l'énergie de la source permet de minimiser l'influence de la répartition des phases dans le cas où le type de l'écoulement ne peut pas être déterminé.

d3 Choix du rayonnement

Un rayonnement est caractérisé par son énergie, ou plus exactement, par son spectre d'énergie et par son intensité.

Le contraste est défini par le rapport

$$\frac{IV}{IL} = \exp(\mu_L - \mu_V)\ L$$

Il donne une indication sur la sensibilité de la méthode.

Plus le contraste est grand, plus la sensibilité de la méthode est élevée.

Néanmoins, pour un contraste trop important, l'erreur due au choix de la formule d'absorption (série ou parallèle) est à prendre en compte dans le cas d'écoulements diphasiques.

. Pour augmenter le contraste, il faut augmenter $\frac{\mu}{\rho}$ donc diminuer l'énergie.

. La fluctuation d'émission des photons étant de la forme $\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$, il faut une intensité de source suffisamment forte pour être précis.

Si l'intensité de la source est donnée, il faut diminuer le coefficient d'absorption massique, donc augmenter l'énergie pour améliorer la précision.

Si l'énergie de la source est donnée, il faut augmenter son intensité.

A intensité de source égale, la sensibilité et la précision de la méthode donnent des contraintes opposées sur l'énergie des photons.

Le choix de l'intensité des sources est lié à l'erreur sur l'émission des photons, mais aussi à des problèmes pratiques : protection de l'environnement lors des mesures et du transport des sources.

La stabilité de la source dans le temps est également un paramètre pour la précision des mesures.

Le tableau ci-dessous présente les avantages et les inconvénients comparés des rayonnements X et γ

RAYONNEMENT	X	γ
Energies	Domaine limité	Choix important
Intensité de la source	Importante	Limitée
Stabilité dans le temps	Mauvaise	Bonne

L'avantage des sources gamma est leur stabilité énergétique. Dans le cas de rayons X, des dérives importantes peuvent se produire et, pour atténuer leur influence, il est nécessaire d'asservir la chaîne de comptage à l'alimentation du tube pour que la fenêtre énergétique du monochromateur (sélecteur d'amplitude) suive les variations en énergie du pic d'émission des photons X. De plus à cause des inhomogénéités de l'anticathode, une source X peut présenter des fluctuations importantes d'intensité selon le point d'émission.

Les sources γ les plus couramment utilisées sont les suivantes :

NUCLEIDE	ENERGIE (keV)	RENDEMENT (%)	PERIODE
^{60}Co	1178 1333	99.9 100	5.2 ans
^{137}Cs	660	85	29.4 ans
^{145}Sm	61	12.8	340 jours
^{153}Cd	72	2.4	242 jours
^{170}Tm	84	3.2	129 jours
^{241}Am	60	36	458 ans

Compte tenu de l'épaisseur des parois et du diamètre des canalisations, la source de cobalt 60, d'énergie importabte et de demi-vie élevée à été retenue.

Elle peut être obtenue avec des activités importantes (1000 Ci). A titre d'exemple, nous présentons 3 calculs correspondant à des énergies faibles, moyennes et fortes, issues de sources gamma habituelles.

Cas nº	Energie moyenne (MeV)	Sources γ	Σ acier	Σ eau (ρ = 1)
1	0.1	Cd 109.Co 57	2.704	0.167
2	0.7	Cs 137	0.56	0.084
3	1.2	Co 60	0.42	0.064

C'est bien évidemment l'acier qui apporte la plus forte contribution à l'atténuation.

Le tableau ci-dessous donne dans chacun des 3 cas :

. Les atténuations en phase vapeur,
. Le contraste

Pour : Ø 70 cm
Epaisseur des parois 7 cm

ρ_{H2O} liquide = 0.593 g/cm3 155 bar
ρ_{H2O} vapeur = 0.102 g/cm3 345°C

CAS Nº	1/Rv	R_L/R_V
1	$9.1\ 10^{16}$	311
2	$4.63\ 10^{3}$	17.94
3	$5.65\ 10^{2}$	9.02

d4 Source non monoénergétique

Comme le montre la formule (1) c'est essentiellement par l'intermédiaire des coefficients d'aborption linéaire μ que l'énergie du faisceau va influer.

Plus précisément, puisque :

$$\mu (S, T) = \sigma(E).\ \rho(T).$$

C'est la fonction $\sigma(E)$ qu'il importe de connaître.

La loi d'absorption (1) est valable pour une énergie Eo bien définie.

Dans le cas du Cobalt 60, qui émet des γ à 1.17 MeV avec un rendement de 100 %, et à 1.33 MeV avec un rendement de 100 %, on reçoit en fait (si on détecte uniquement les γ n'ayant subi aucun choc).

$$\Pi = I\ (Eo - \delta) + I\ (Eo + \delta)$$

ou $Eo = \frac{E1+E2}{2} = 1.25$ MeV

Dans la bande en énergie 1.17 - 1.33 MeV, σ est proportionnelle à E pour le fer et l'eau.

$$\Pi = Io \left[\exp - \left(\sigma_{p1}\, \rho_p\, e_p + \sigma_1 \rho . e \right) + \exp \left(\sigma_{p2}\, \rho_p\, e_p + \sigma_2\, \rho\, e \right) \right]$$

L'indice p se réfère à la paroi en acier

1	à l'énergie de 1.17 MeV
2	1.33 MeV
o	1.25 MeV

que l'on peut écrire sous la forme :

$$\Pi = \exp \left(\sigma p_o . \rho_p . e_p + \sigma_o . \rho . e \right) \times$$

$$2ch \left(\frac{\sigma_{p1} - \sigma_{p2}}{2}\, \rho_p . e_p + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\, . \rho . e \right)$$

En clair, cette relation montre que en traitant le problème comme si la source émettait 2γ à 1.25 MeV on sous-estime le signal d'un facteur ch (ε_p. ρ_p.ep + ε.ρ.e). En fait, ce qui nous intéresse est le rapport :

$$R = \frac{\text{Log } I(\rho) \,/ IN1(\rho 1)}{\text{Log } I2(\rho 2)/I1(\rho 1)}$$

$$= \frac{\rho - \rho 1}{\rho 2 - \rho 1} \qquad \text{dans le cas d'une source mono-énergétique}$$

I1 (ρ1) Correspondant au signal mesuré par une densité ρ1 connue

I2 (ρ2) Correspondant au signal mesuré par une densité ρ2 connue

Dans le cas de la ligne d'expansion du pressuriseur (cf 2ème partie), l'erreur commise serait de l'ordre de 8.10^{-4} que l'on peut considérer comme négligeable.

d5 Sources parasites

La formule (1) repose sur l'hypothèse que le détecteur ne prend en compte que les gammas émis par la source et transmis sans choc.

Dans la réalité deux types d'effets peuvent influencer le taux de comptage :

- les gammas diffusés dus à la source
- les gammas provenant de sources "parasites".

* Rayons_gamma_diffusés

Nous avons vu (II.1.1.a) que dans notre cas l'interaction prédominante était la diffusion Compton. Des erreurs peuvent être commises, en acceptant des photons diffusés qui reviennent dans le faisceau à une énergie dégradée, contribuant à surestimer l'intensité du faisceau reçu sur le détecteur. Cet effet peut être minimisé et les erreurs tenues pour négligeables en optimisant la collimation du faisceau (faisceau étroit, collimateur quadrillé) ce qui élimine les γ ne venant pas de la direction de la source.

On peut aussi compter les γ dans une bande en énergie étroite autour de la valeur de l'énergie d'émission. (cette méthode peut être appliquée pour un faisceau large et un détecteur peu ou pas collimaté). Néanmoins, cette méthode nécessite de travailler en impulsion, et conduit à l'utilisation d'ensemble scintillateur photomultiplicateur qui a ses propres limitations (cf. d6).

* Gammas_des_sources_parasites

Différents émetteurs γ peuvent se retrouver dans le réfrigérant primaire. Il s'agit essentiellement :

- Des produits de fission liés, soit à la contamination initiale des gaines lors de la fabrication, soit à des ruptures de gaines.

- De l'Azote 16, produit par la réaction O16 (n, p) $N16 \xrightarrow{\beta^-} O16$, émettant des γ de 6 MeV avec une période de 7.1 s.

- Des produits de corrosion en solution.

- Des dépôts de produits de corrosion sur la surface interne de la tuyauterie.

Différentes solutions permettent de réduire la contribution de ces sources parasites.

- Choix de la collimation
  L'utilisation d'un collimateur quadrillé (Fig 21) permet de réduire le volume actif des sources parasites.

- Discrimination en énergie
  Lorsque le taux de comptage total n'est pas élevé ($< 4.10^5\ s^{-1}$ Cf. d6), une mesure à l'énergie de la source permet de limiter l'importance des γ émis à des énergies différentes de celles de la source.

- Détection synchrone
  L'utilisation d'une source pulsée (disque ajouré tournant devant la source par exemple) peut permettre d'améliorer le rapport $\frac{\text{signal utile}}{\text{signal parasite}}$ d'un facteur important. (cf. Annexe 2).

- Détecteur témoin (Fig. 2)
  Un détecteur hors du flux de la source, placé à proximité du détecteur de mesure, mesure de la contribution des sources parasites son signal étant soustrait de celui fourni par le détecteur de mesure. Des erreurs importantes sont commises lorsque le signal parasite est nettement supérieur au signal utile ; ces 2 détecteurs doivent être étalonnés avec précision.

d6 Autres sources d'erreurs

Pour être complet, notons que n'apparaissent pas de façon explicite dans la formule (1), plusieurs autres causes d'erreurs qui, dans certains cas peuvent être importantes, et sont liées principalement au type de détecteur utilisé.

* Le temps mort de comptage (cas d'un détecteur en impulsion)

Deux impulsions successives ne peuvent être comptées que si l'intervalle de temps qui les sépare est supérieur à une certaine valeur appelée temps mort de comptage.

Ce temps mort contient la largeur de l'impulsion (environ 1 µs), le temps de comptage et de mise en mémoire (environ 2 à 3 µs de plus).

Cette notion de temps mort fixe le taux maximum de comptage qui peut être accepté par une chaîne de comptage. Avec les valeurs typiques précédentes, on voit que l'on peut mesurer au plus jusqu'à $4\ 10^5\ s^{-1}$ environ.

Un taux de comptage supérieur nécessite de travailler en courant, et ne permet plus de pratiquer de discriminations en énergie.

* La dérive de l'électronique

Elle est principalement liée à la tension d'alimentation des dynodes d'un photomultiplicateur (P.M). La sensibilité d'un P.M varie comme la puissance n de la tension d'alimentation, n étant le nombre de dynodes. Il est donc nécessaire d'avoir une alimentation stabilisée à mieux que 10^{-3} et de refaire des mesures d'étalonnages à des époques différentes. L'ensemble P.M scintillateur est aussi sensible aux variations de température (de l'ordre de $1°/_{oo}/°C$), et nécessite une régulation en température. Les chambres à ionisation sont moins sensibles à ces effets et ont une meilleure reproductibilité pour des mesures s'effectuant dans un milieu soumis à des variations de température importantes.

* Le bruit de fond

Il a plusieurs causes :

- rayons cosmiques,
- bruits thermiques (essentiellement préamplificateur),
- émission spontanées de la photocathode, et des dynodes (cas d'un P.M).

Ce bruit, essentiellement aléatoire peut être réduit :

- en optimisant le montage et la protection du détecteur,

- dans le cas d'un P.M, en le refroidissant et en le plaçant dans un champ magnétique (on dévie ainsi les électrons les moins énergétiques du bruit de sorte qu'ils n'atteignent pas l'électrode collectrice),

- en sélectionnant une gamme d'énergie à l'aide d'un sélecteur monocanal.

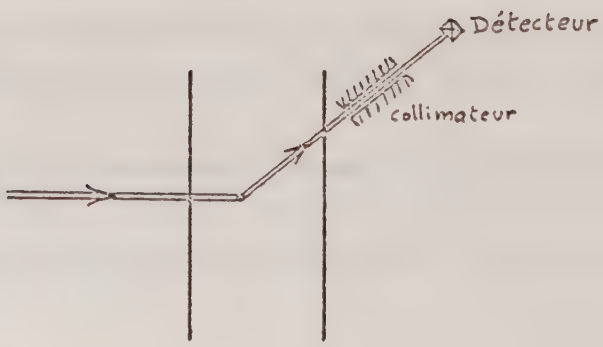
Malgré cela, il demeure toujours un bruit résiduel dont l'influence peut ne pas être négligeable pour de faibles taux de comptages ; mais on connait le sens de l'erreur induite puisque l'influence du bruit de fond ne peut se traduire que par un sur-compte.

Une correction simple consiste à retrancher des mesures effectués un nombre de coups égal à $\beta m.T$ si βm est le taux de bruit moyen et T le temps de comptage.

III.1.2 Diffusion de gamma

KONDIC et HANN suggèrent que le comptage des γ diffusés par effet Compton dans le milieu traversé, peut constituer la base d'une détermination du taux de vide local /16/.

Ils montrent par une étude théorique que la mesure du faisceau diffusé et collimaté permet d'accéder à la variable caractéristique de la phase, localisée à l'intersection entre le faisceau incident et l'axe du "faisceau diffusé".



L'application de cette méthode est décrite par différents auteurs. (/17/, /18/).

Cette technique est la seule à permettre une mesure locale ne nécessitant pas, comme les sondes, de pénétrer dans l'écoulement.

Un inconvénient majeur est la faiblesse des taux de comptage imposant des temps d'intégration très importants, d'une heure par exemple, pour une source de 25 Curies /19/.

Nous ne citons cette méthode que pour mémoire.

III.2 Utilisation de neutrons

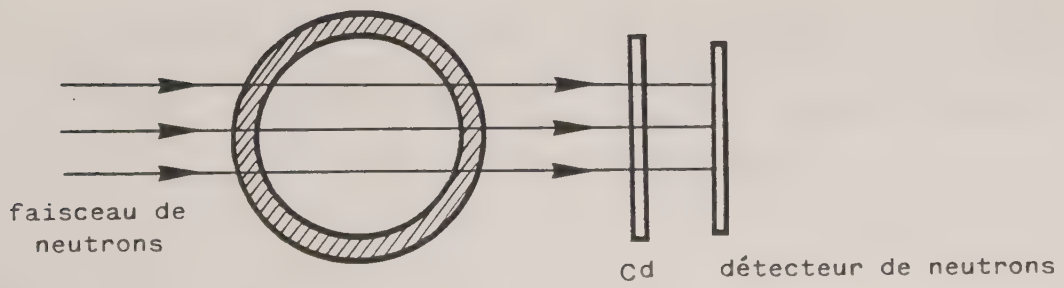
III.2.1 Atténuation du faisceau transmis sans choc

III.2.1.1 Principe

La technique est analogue à celle utilisée pour l'atténuation des rayons X ou γ.

Un faisceau de neutrons est émis perpendiculairement à la tuyauterie.

Le compteur, opposé diamétralement à la source détecte les neutrons qui ont traversé le milieu sans subir de choc, les neutrons diffusés étant arrêtés à l'aide d'une feuille de cadmium.



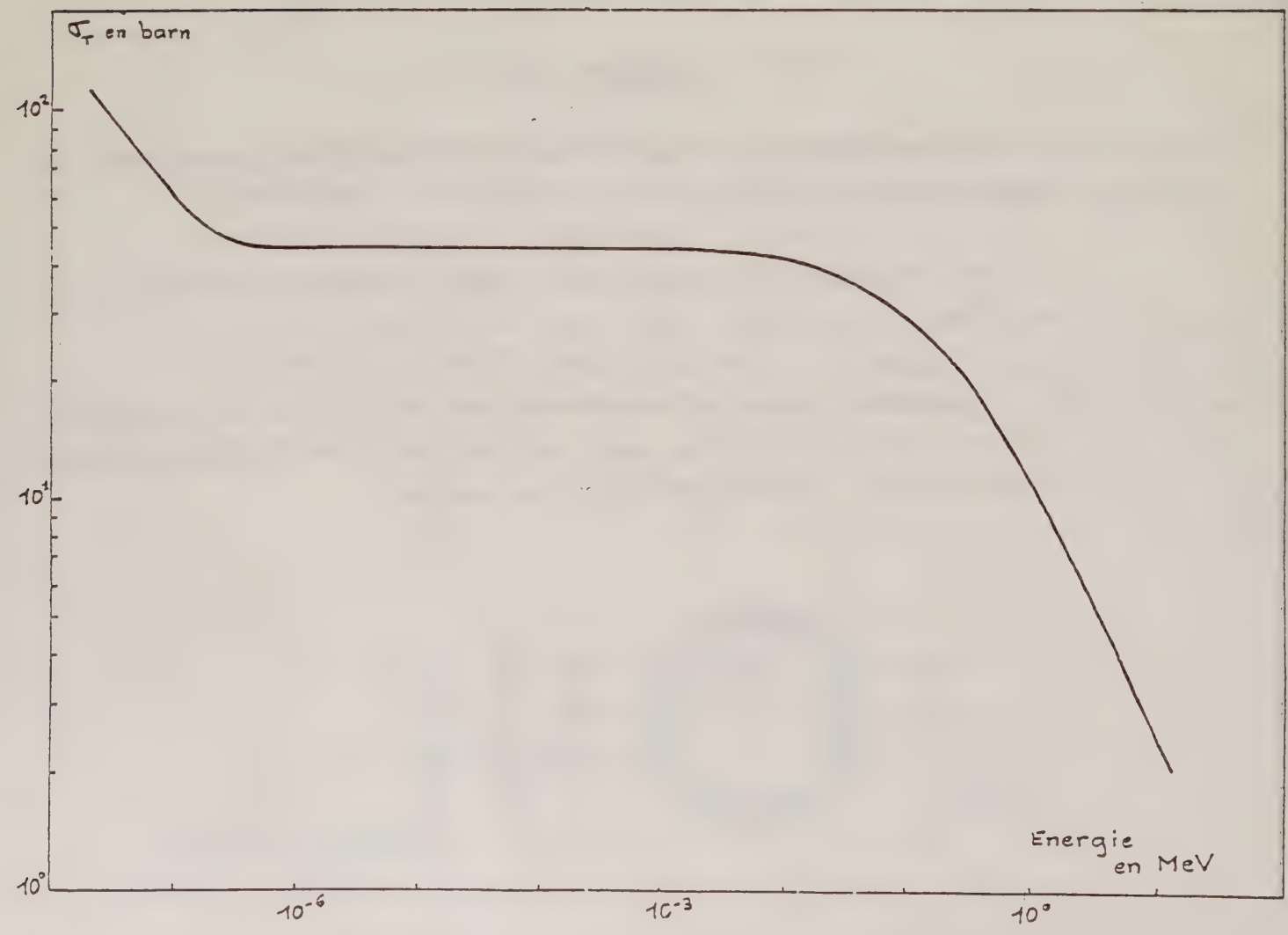
Par l'utilisation d'un faisceau collimaté, on peut accéder au taux de vide (ou à la densité) le long d'une corde et effectuer une projection complète de la canalisation pas par pas.

III.2.1.2 Choix de l'énergie de la source

Contrairement aux rayons X et γ, les neutrons interagissent fortement avec l'hydrogène présent dans l'eau.

Pour cette raison l'utilisation de neutrons de basse énergie est limitée à des mesures sur des tuyauteries de faibles dimensions, à cause de l'absorption.

La figure ci-dessous donne la section efficace microcopique de l'eau en fonction de l'énergie des neutrons.



SECTION EFFICACE MICROSCOPIQUE TOTALE DE L'EAU

La méthode par transmission à été utilisée par plusieurs auteurs, qui utilisent des neutrons issus de sources diverses.

Généralement, les sources de type Sb - Be, Po - Be, Pu - Be, Am - Be, sont de trop faible intensité et nécessitent des temps de comptage importants (/22/, /23/).

Des mesures sur des grands diamètres (70 cm, par exemple pour une branche chaude) nécessitent l'emploi d'accélérateur, permettant de produire :

- Les neutrons de 3 MeV, issus de la réaction D + D des neutrons incidents sur une cible deutérée.

- Des neutrons de 14 MeV, issus de la réaction D + T des neutrons incidents sur une cible tritiée.

La quantité de neutrons débités au niveau de la cible est de l'ordre de 10^{10} neutrons/s sur 4π pouvant aller jusqu'à 10^{12} n/s sur 4π pour une cible tritiée /21/.

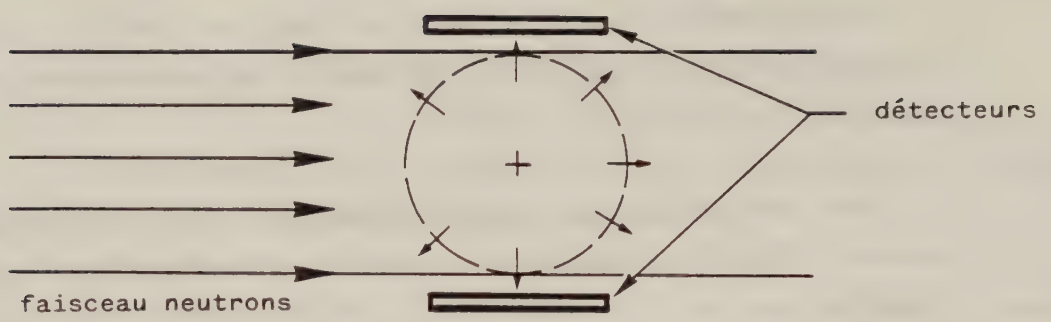
L'usure rapide de la cible limite ces méthodes à des mesures ponctuelles dans le temps.

III.2.2 Détection des neutrons diffusés

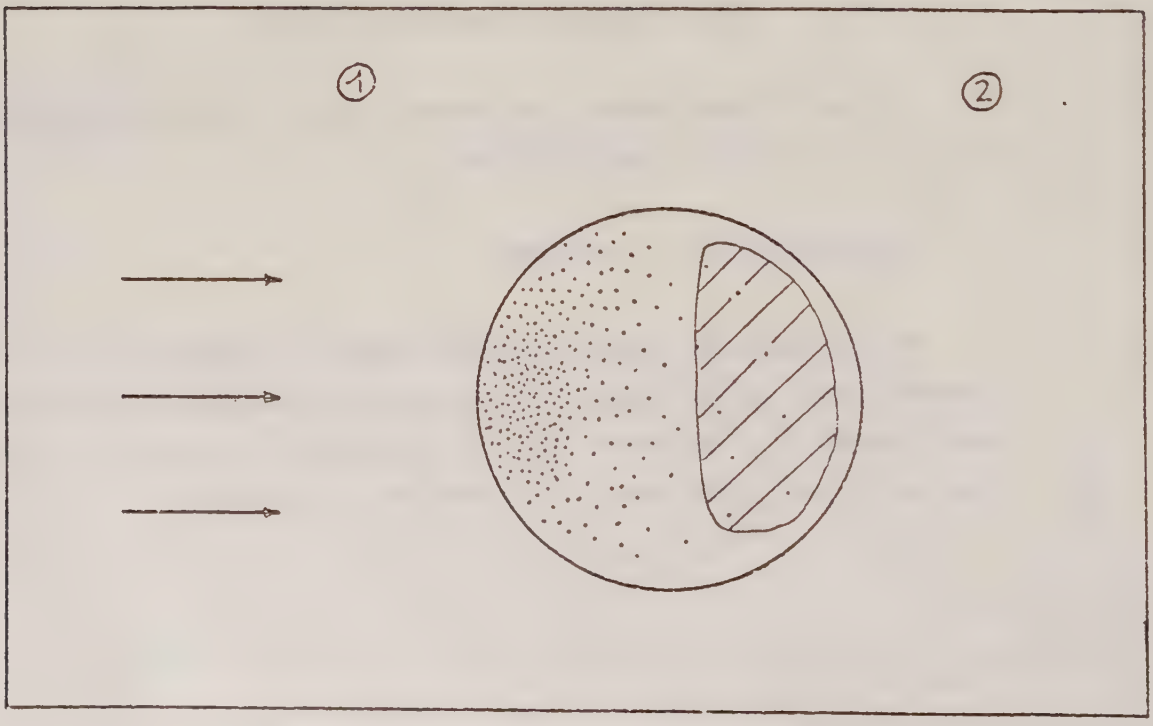
Cette méthode permet une mesure globale sur une section droite ou dans un volume de la canalisation.

Le principe est le suivant :

Un faisceau de neutrons pénètre dans la tuyauterie. Les neutrons se thermalisent et diffusent sur l'eau contenue dans la canalisation. Ils sont captés à l'extérieur par un détecteur de neutrons thermiques, qui émet un signal fonction de la quantité d'eau./21/.



L'énergie des neutrons incidents doit être optimisée en fonction du diamètre de la canalisation. Pour une énergie faible et un diamètre important, la répartition des neutrons diffusés ne sera pas homogène, comme le montre l'exemple ci-dessous. Il donne la répartition de la densité de neutrons thermiques à l'intérieur d'une canalisation de grand diamètre remplie d'eau, pour des neutrons incidents de faible énergie ; on note une importante densité de neutrons dans les premiers centimètres d'eau.



La réponse des détecteurs sera plus forte en rétrodiffusion (détecteur 1) que vers l'avant (détecteur 2). La présence ou l'absence d'eau dans la zone hachurée ne modifiera pratiquement pas la réponse, ce qui conduit à une faible sensibilité de la mesure dans le cas de faible taux de vide. De plus, une expérience de ce type peut conduire à une réponse non monotone ; la réponse, d'abord croissante avec le taux de plein, diminuera ensuite du fait de l'augmentation de l'absorption dans l'eau (/22/). Ducros /21/ a montré que pour une canalisation d'un diamètre supérieur à 10 cm, le meilleur domaine de fonctionnement se situe au-delà de 1 MeV, et nécessite l'emploi d'un générateur de neutrons de 14 MeV permettant la meilleure détermination du taux de vide global.

IV. CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Parmi les différentes méthodes permettant de mesurer des caractéristiques du fluide primaire d'un PWR, celle utilisant la transmission de rayonnements (en particulier les γ) semble la plus intéressante.

- Elle ne nécessite pas d'intervenir sur les structures.
- Elle permet des mesures globales.

Nous présentons dans les parties suivantes différentes applications de cette méthode.

REFERENCES SUR LA PREMIERE PARTIE

/ 1/ L. CIMORELLI, A. PREMOLI

"Measurement of void fraction with impedance gauge technique".
Energia Nucleare, Vol. 13, p. 12 January 1966.

/ 2/ ØRBRECK

The impedance void meter, symposium on in core instrumentation
OSLO, 15 th - 19 th - June 1964 pap. D8

/ 3/ NYLUND O. et Al

"Measurements of hydraudynamics characteristics instability thresholds and Burnout limits for 6. Rod clusters in naturel and forced circulation".
AB Atomenergi and ASEA, Sweden, FRIGG 1 - 1967.

/ 4/ G.F HEWITT and P.C. LOVEGROVE

"Experimental methods in two phases flow studies"
EPRI - NP 118 - March 1976.

/ 5/ G.F. HEWITT

"The role of experiments in two phases systems with particuliar reference to measurements techniques".
Journal of British Nuclear Energy Society. Vol. 12 n°2 1973.

/ 6/ M. REOCREUX et JC. FLAMAND

"Etude de l'utilisation des sondes résistives dans des écoulements diphasiques à grande vitesse".
CENG. Rapport TT n°111 1972

/ 7/ J.P. GALAUP

Contribution à l'étude des méthodes de mesure en écoulements diphasiques
THESE DE DOCTEUR INGENIEUR - GRENOBLE 28 Avril 1975.

/ 8/ N. MILLER, MITCHIE RE

"Measurement of local voidage in liquid/gaz two phases flow system.
The J. of British Energy Society, Vol. 9 n°2 94-100 1970

/ 9/ DANEL E, DELHAYE J.M

Sonde optique pour mesure du taux de présence local en écoulement diphasique.
Mesures - régulation - automatique 19, 101.

/10/ J.M DELHAYE

Mesure du taux de vide local en écoulement diphasique eau air par un anémomètre à film chaud.
Rapport C.E.A. 3465.

/11/ J.M. DELHAYE, R. SENEGRIA, J.C FLAMAND

"Void fraction, vapor and liquid temperature. Local measurements in two phases flow using a microthermocouple".
J. Heat transfer, Aug. 1973, 365 - 370.

/12/ AFGAN

"An approach to the analysis of temperature fluctuation in two phases flow".
J. Heat transfer, 16, 187 - 193 1973.

/13/ BONNE J.A et OSBORN R.K

"On the use of acoustic waves in nuclear power reactors to determine average void fractions".
Nuclear Science and Engineering. Vol 43 1971.

/14/ SCHROCK V.E

"Radiation attenuation techniques in two phase flow measurements".
11th National ASME/AIche Transfert Conference.
Minneapolis - August 3-6 1969.

/15/ BURGESS M.H

"Principles of X-Ray and Gamma densitometer analysis of transient two phase flow".
UKEA - AEEN R 1127 - Février 1978

/16/ KONDIC N.N et HAHN O.J

"Theory and application of the parallel and diverging radiation beam method in two phase flow".
4 th international heat transfert conference.
Papier MT.15 Versaille Septembre 1970.

/17/ R.R GAY, S. SCHELL, R.T LAMEY

"The side Scatter gamma technique for local density measurements".
ANS transaction 30, 508 - 510 1978.

/18/ R.R. GAY, R.T LAMEY

"Dynamic bias in side Scatter gamma density measurements".
ANS transaction 32, 816 - 818 1979

/19/ G.F HEWITT and P.C LOVEGROVE

"Experimental methods in two phase flow studies"
EPRI - NP 118 March 1976

/20/ J. AOYEDELE, A.A HARMS

"Measurements of void frequency distributions and void profils in nucleate poor boiling using neutron beams". 1979

/21/ DUCROS G.

"Determination du taux de vide et de la configuration d'un écoulement diphasique à l'aide d'un faisceau de neutrons".
THESE DU DOCTEUR INGENIEUR - GRENOBLE 1980

/22/ BOISVERT J.

"Void fraction measurement using an Am - Be source"
A.N.S. Transactions 24, 122-123 1976

/23/ F.V. FRAZOLLI, A. MAGRINI, L. MANCINI

"Void fraction measurement in water steam mixture by means of a 252 cf source".
Int. Journal of applied radiaction and isotopes
Vol. 29 1978

/24/ H. JOHN et AL

"SERIELLES 5 - STRAHL γ - DENSITOMETER ZUR DICHTEMESSUNG EINER ZWEI PHASENSTRÖMUNG"
Kernforschungszentrum Karlsruhe.
KFK 2783 November 1979

/25/ CONDON R.A., AND SHER

"Measurement of void fractions in parallel rod Aways".
Nucl. Sci. Eng. Vol. 14 p. 327 1962

/26/ Storm E and ISRAEL, HI
"Photon cross sections form 1 keV to 100 MeV for elements Z = 1 to Z = 100".
Nuclear Data tables, 177, 565-681. 1970

/27/ J.M. DELHAYE

"Some examples of measurement techniques used in GAS-LIQUID flows".
C.E.N.G
GVC Jahrestreffer 1980 der Verfahneus - Ingenieurs.
Strasbourg, October 1.3 1980

/28/ C.E.A. "Statistique appliquée à l'exploitation des mesures".
Masson 1978.

/29/ B. MICAUX

Conception et fonctionnement des réacteurs PWR
Cours D.E.A. physique des réacteurs 1979

2ème P A R T I E :

MESURE DE TEMPERATURE ET DE DEBIT DANS LA LIGNE D'EXPANSION DU PRESSURISEUR PAR TRANSMISSION GAMMA

I. INTRODUCTION

La ligne d'expansion du pressuriseur est soumise à un nombre important de transitoires thermiques dû à sa fonction de liaison entre deux zones du circuit primaire à des températures différentes : Pressuriseur à 345°C et branche chaude de 286°C en arrêt chaud, à 322°C à pleine puissance.

Les calculs de fatigue de la ligne d'expansion (en particulier au niveau des liaisons avec la branche chaude et de la liaison avec le pressuriseur) nécessitent la connaissance des variations de température d'eau et de leur vitesse de propagation, ainsi que du nombre de transitoires, au cours du fonctionnement d'un réacteur.

Pour caractériser expérimentalement ces variations nous avons développé une méthode par transmission de rayonnement gamma.

Le principe de cette méthode repose sur la mesure des variations de transmission des γ issus d'une source de Cobalt 60, en fonction de la masse volumique de l'eau dans une section de la tuyauterie.

Connaissant cette masse et la pression du circuit nous pouvons remonter à la température.

Deux points de mesure sont prévus ; les variations de taux de comptage étant représentatives des variations de température, l'observation de ces variations mesurées en amont et, avec retard, en aval permet d'obtenir la valeur du débit.

Les points suivants sont en faveur de cette méthode.

- Elle est de mise en oeuvre facile et ne nécessite pas d'intervenir sur la tuyauterie. (La présence des sources n'augmentera pas le débit de dose gamma de façon notable dans le local).

- Elle permet une mesure de température réelle de l'eau dans la ligne d'expansion avec un faible temps de réponse.

Dans les paragraphes suivants nous présentons :

- Les études préliminaires qui ont servi à définir le projet d'un dispositif sur site : principe des mesures de température et de débit. Dans chaque cas, on étudie les phénomènes risquant de perturber ou d'entraîner des erreurs sur les mesures, ainsi que la précision estimée compte tenu des choix faits sur les sources et les détecteurs.

- Les études sur maquette qui nous ont permis en particulier de vérifier la validité des méthodes de calcul employées.

II. MESURE DE TEMPERATURE

II.1 Principe de la gamma - densitométrie

Le principe est de mesurer la température de l'eau à partir de sa densité. On place en deux points de la ligne d'expansion un système source-détecteur diamétralement opposés, plus un détecteur témoin, hors du flux de la source (Figure 2).

Le principe de la méthode d'atténuation gamma est décrit dans la première partie (III.1).

Le formalisme d'atténuation en ligne droite permet de cerner les variations qui sont observées, avec une précision suffisante. Des essais sur maquette (décrits en IV.2) ont permis de confirmer cette hypothèse.

II.2 Sensibilité de la méthode

En cas de variation de température, le taux de comptage variera selon la formule :

$$\frac{1}{\tau}\ \frac{d\tau}{dTH2O} = -\frac{\ell}{\lambda}\left(\frac{1}{\bar{\rho}}\ \frac{d\bar{\rho}}{dT_{H2O}}\right)$$

T_{H2O} : Température de l'eau en face du détecteur,
λ : Libre parcourt moyen dans l'eau,
ℓ : Diamètre de la tuyauterie,
$\bar{\rho}$: Masse volumique moyenne dans la tuyauterie.

Soit pour une source de Cobalt 60, l'eau étant à 330°C et 155 bars.

$$\frac{1}{\tau}\ \frac{d\tau}{dT_{H2O}} = 5.9\ °/_{oo}/°C$$

II.3 Description du dispositif prévu sur site

En un point de mesure, le dispositif de mesure de température comprend (Figure 2) :

- La source et le conteneur de source,
- Le collimateur de source,
- Le détecteur et son collimateur,
- Le détecteur témoin et son collimateur.

Les descriptions du château de transport et des collimateurs de la source et du détecteur sont représentées sur les Figures 8 à 10.

Le collimateur du détecteur témoin est identique à celui du détecteur situé face à la source.

Le détecteur est une chambre à ionisation du type LND 50312 remplie au Xénon sous 10 atmosphères, de caractéristiques suivantes :

- Sensibilité $\simeq 5.10^{-10}$ A/R/h
  (sensiblement constante avec l'énergie) déterminé d'après /4/.

- Charge moyenne par interaction : $0.6\ 10^{-15}$ coulomb.

- Volume utile : 205 cm^3.

- Longueur utile : 20 cm

Ainsi que nous l'avons indiqué dans la première partie (III.1.1.) la source est du Cobalt 60.

L'intensité a été prise en fonction de l'étude ; nous avons retenu une source de 20 Ci.

II.4 Modèle de calcul utilisé

Les calculs ont été effectués avec le Code MERCURE IV, qui calcule l'atténuation des gamma, dans une géométrie à trois dimensions, par intégration des noyaux ponctuels d'atténuation en ligne droite selon une technique de Monte-Carlo dans l'approximation multigroupe. /1/.

Nous avons réalisé au moyen de ce code le modèle d'une installation se rapprochant de celle qui a été montée sur site (Figure 3).

II.5 Taux de comptage dû à la source

La Figure 4 montre la variation du flux sans choc au niveau du détecteur pour une source de 20 Ci de Cobalt 60, la source étant placée à 110 cm du détecteur. Soit, pour le détecteur considéré plus haut un taux de comptage variant de $1.8\ 10^5\ s^{-1}$ à $2.4\ 10^5\ s^{-1}$, la température passant de 280°C à 340°C.

II.6 Taux de comptage dû aux sources parasites

II.6.1 Azote 16

Dans le cas de transitoires allant dans le sens du circuit primaire vers le pressuriseur, on verra passer devant les détecteurs de l'eau provenant de la tuyauterie chaude et donc chargée en Azote 16 (émetteur gamma de 6 MeV, période 7.1s).

L'activité de l'Azote 16 dans la tuyauterie chaude est proportionnelle au niveau de puissance. A puissance nominale, 200 Ci/m3 est un majorant de la valeur réelle (/2/). Une telle activité dans la ligne d'expansion provoquerait un taux de comptage de l'ordre de $2\ 10^6 s^{-1}$ sur les détecteurs.

Les détecteurs sont aussi soumis à un flux dû à l'Azote 16 "ambiant" provenant de la branche chaude du circuit primaire.

Ce flux a été estimé dans l'approximation d'atténuation en ligne droite. La géométrie considérée pour le calcul est représentée sur la Figure 5.

Les valeurs de Ø N16 ligne d'expansion/Ø source de Co^{60} de 20 Ci et de Ø N16 ambiant/Ø N16 ligne d'expansion, sont donnés sur la Figure 6 en fonction du temps de transit, une plaque de plomb de 5 cm ayant été rajoutée sur le côté de la collimation afin de réduire la contribution du flux ambiant.

II.6.2 Dépôts de produits de corrosion

La contribution des produits de corrosion à la fin du premier cycle serait de $\tau_{pc} = 1,7\ 10^{4}\ s^{-1}$.

En prenant pour valeurs d'activités déposées : (/3/)
pour le Co^{58} (98 % à 0.81 MeV) : 8,9 $\mu Ci/cm^2$
pour le Co^{60} (100 % à 1.17 MeV et 1,33 MeV) : 1,7 $\mu Ci/cm^2$

Ces produits de corrosion ont été pris en compte dans le modèle sous la forme d'une source volumique répartie dans une couronne de faible épaisseur en périphérie de la tuyauterie.

Les sources parasites entraînent une surestimation du taux de comptage et peuvent conduire à des erreurs importantes.

Afin de minimiser cet effet, et de limiter l'intensité des sources, l'utilisation d'un détecteur témoin, hors du flux de la source à été retenu.

Le signal fourni par le détecteur témoin est soustrait du détecteur situé en face de la source. Il convient d'estimer la précision que l'on peut atteindre avec un tel système.

II.7 Estimation de la précision de la mesure de température par densité

La précision de la mesure de température est liée :

- à la précision statistique, associée au taux de comptage et à la bande passante,

- à l'étalonnage entre détecteur face à la source et détecteur témoin lorsqu'il y a contribution de l'Azote 16 dans l'eau.

Soit τ_{Co} le taux de comptage dû à la source de Co^{60} sur le détecteur situé en face de cette source et τ_b le taux de comptage éventuel, dû à d'autres émetteurs (principalement N^{16}), observé aussi bien sur le détecteur face à la source que sur le détecteur témoin.

Le signal vu par le détecteur face à la source est :

$$S_1 = \tau_{Co} + \tau_b$$

Le signal vu par le détecteur témoin est :

$$s_2 \simeq \tau_b$$

Dans le cas où il n'y a pas de contribution sur le détecteur témoin ($\tau_b = 0$). L'écart type des fluctuations relatives sur s_1 est donné par :

$$\frac{\sigma_{s_1}}{s_1} = \frac{1}{\sqrt{2\theta\tau_{Co}}}$$

où θ est la constante de temps du filtre passe bas du premier ordre utilisé pour conditionner le signal en sortie des détecteurs.

Pour un taux de comptage τ_{Co} de 2×10^5 s^{-1} (valeur prévue avec une chambre d'ionisation à γ LND 503 - 12, remplie au Xénon sous 10 atmosphères), et une constante de temps θ de 0,1 s, l'écart type relatif du signal s_1 est :

$$\frac{\sigma_{s1}}{s_1} = 5 \times 10^{-3}$$

soit un écart type en température de 0,8°C. En prenant $\theta = 1$ s, cet écart type en température passe à 0,3°C.

Dans le cas où il existe une contribution sur le détecteur témoin (principalement présence d'Azote 16), le signal utilisé pour remonter à la température est : $s = s_1 - s_2$ de façon à supprimer la contribution due aux émetteurs autres que la source de Co^{60}. Le détecteur et le détecteur témoin auront été étalonnés entre eux. On peut considérer que, toutes erreurs cumulées, la différence de sensibilité de ces 2 détecteurs, aux émetteurs autres que la source de Co^{60} est inférieure à 10^{-2}. Soit k le rapport de ces sensibilités ($k = 1 \pm 10^{-2}$). Le signal compensé s s'exprime donc par :

$$s = \tau_{Co} + \tau_b - k\,\tau_b$$

L'imprécision sur s est donc liée à la statistique de comptage, comme nous venons de le voir plus haut (dipersion) et à l'imprécision sur le facteur d'étalonnage k (biais).

- En ce qui concerne la statistique de comptage,

$$\sigma_s^2 \simeq \sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2$$

soit :

$$\sigma_s^2 \simeq \frac{\tau_{Co} + \tau_b}{2\theta} + \frac{\tau_b}{2\theta} = \frac{2\tau_b + \tau_{Co}}{2\theta}$$

et l'écart type relatif est donné par :

$$\frac{\sigma_s}{s} = \frac{\sqrt{2\tau_b + \tau_{Co}}}{\tau_{Co}} \quad \frac{1}{\sqrt{2\theta}}$$

- Du point de vue de l'étalonnage, l'incertitude Δk ($\leq 10^{-2}$) sur k introduit un biais Δs :

$$\Delta s = \Delta k\ \tau_b$$

et en valeur relative :

$$\frac{\Delta s}{s} = \Delta k \quad \frac{\tau_b}{\tau_{Co}}$$

La Figure 7 présente :

- d'une part l'écart type en température en fonction de $\tau_{Co} \times \theta$ (courbe (a)) dans le cas où $\tau_b = 0$.

- d'autre part (courbe (b)) l'écart type en température, dans le cas où il y a présence d'Azote 16 dans la tuyauterie, en fonction du temps de transit de N^{16} de la branche chaude jusqu'au point de détection ($\tau \times \theta = 2 \times 10^4$, réacteur à puissance nominale).

Il est clair que, pour les fortes valeurs de τ_b dû à l'Azote 16, c'est la présence d'Azote 16 au niveau du détecteur témoin qui indique précisement que l'eau est à la température de la branche chaude.

En ce qui concerne la contribution des dépôts de corrosion, à la fin du premier cycle, l'écart type en température serait de :

1.13°C	pour θ = 0.1 s
0.5°C	pour θ = 1. s

Les calculs précédents montrent que l'intensité de la source (20 Ci) est suffisante.

La précision statistique sera d'autant meilleure que θ serant grand, mais une valeur trop élevée de θ limite la mesure des vitesses, ainsi que nous allons le voir.

III. DETERMINATION DU DEBIT

III.1 Description du dispositif prévu sur site

Le dispositif de mesure des débits comprend deux postes de mesures (décrits en II.3) distants de 1.30 m.

En dehors des contingences d'accessibilité liées d'une part à la distance entre la ligne d'expansion et le mur et à la présence de structures métalliques d'autre part, deux critères ont été pris en compte pour la détermination de la position des détecteurs gamma :

- Observations du maximum de transitoires, que ceux-ci soient dans le sens branche chaude-pressuriseur ou bien qu'ils soient dans le sens inverse.

- La distance entre les détecteurs et la branche chaude doit être suffisante pour limiter l'influence de l'Azote 16.

Le respect de ces conditions nous a conduits à choisir une position qui se situe environ au milieu de la ligne d'expansion.

Une variation de température du circuit primaire de 1°C, entraînant un balayage de la ligne d'expansion, le nombre de transitoires détecté par le système ne devrait pas dépendre fortement de la position des détecteurs.

Pour ce qui concerne la distance entre les deux postes de mesure, celle-ci est limitée pour deux raisons :

- La bande passante conditionne la distance, dans la mesure où l'on ne peut pas, pour des raisons de précision statistique, effectuer des comptages d'une durée inférieure à 0,1 seconde. Dans ces conditions, avec une distance de l'ordre du mètre, il sera possible de mesurer des vitesses inférieures à 10m/s, pour $\theta = 0.1$ s.

- Le front du transitoire ne doit pas être déformé entre les deux points de mesure.

III.2 Analyse du fonctionnement en dynamique

Un tel dispositif permet donc de caractériser le passage des fronts thermiques dans la ligne d'expansion.

Pour analyser le fonctionnement du dispositif en dynamique (passage de fronts thermiques) nous distinguerons les transitoires où le fluide se déplace dans le sens pressuriseur → circuit primaire, et ceux où il se déplace dans l'autre sens.

1) Déplacements dans le sens pressuriseur → circuit primaire

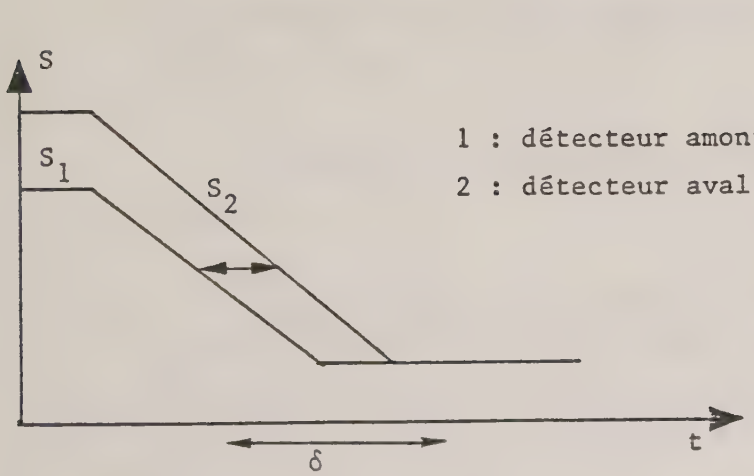
Pour ces transitoires, la température de l'eau est connue à tout instant à partir des détecteurs situés en face des sources de Cobalt 60.

La vitesse moyenne de déplacement du front peut être déterminée en mesurant le temps de transit du transitoire entre deux points de mesure.

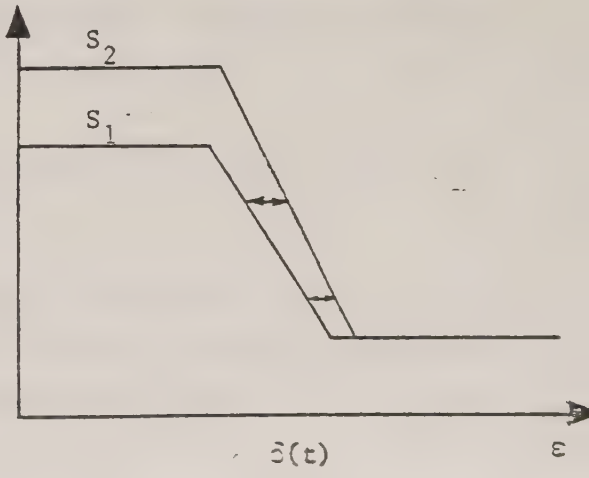
Si S_1 représente le signal reçu par le détecteur amont et S_2 le signal reçu par le détecteur aval, on aura :

$$S_2(t) = S_1\left(t - \delta(t)\right)$$

Si la vitesse du déplacement du front évolue dans le temps, les courbes $S_2(t)$ et $S_1(t)$ seront translatées d'un facteur $\delta(t)$.



1 : détecteur amont
2 : détecteur aval



a) Vitesse de déplacement constante entre les 2 points de mesure

b) Vitesse de déplacement augmentant entre les 2 points de mesure

2) Déplacement dans le sens circuit primaire ____ pressuriseur

Dans le cas de transitoires amples, on verra passer devant les détecteurs de l'eau provenant de la tuyauterie chaude, et donc chargée en Azote 16. Nous avons vu qu'à puissance nominale, la présence d'Azote 16 dans la ligne provoquerait un taux de comptage supérieur d'un facteur 10 à celui dû à la source.

Dans ce cas on utilise l'Azote 16 pour mesurer le débit. La vitesse d'écoulement peut être mesurée par le temps de transit du front d'Azote 16 entre les deux détecteurs témoins.

Par ailleurs, on peut vérifier l'estimation de la vitesse en observant le rapport des taux de comptage des détecteurs témoins en amont et en aval (décroissance de l'Azote 16).

IV. MESURES SUR MAQUETTE

Les essais sur maquette ont pour but :

- Vérifier que les ordres de grandeurs sur les variations et les précisions sont correctes et que l'approximation du modèle d'atténuation en ligne droite est valide pour le montage utilisé. (Contribution faible des gamma diffusés).

- Vérifier que les blindages autour des sources sont suffisants (limitation des débits de dose).

IV.1 Description du dispositif expérimental

Le dispositif est représenté sur la Figure 12. On distingue :

- Le château contenant la source et le collimateur de source.
- Le calorifugeage.
- La section d'essai.
- La collimation du détecteur.

La source est une source de 20 Ci (± 7%) de Cobalt 60. Les descriptions du château de transport, et des collimations de la source et du détecteur sont représentées sur les Figures 8 à 10.

L'eau est simulée par un ensemble de barreaux en polyethylène ; le polyethylène ($CH2_n$) a un coefficient d'atténuation massique proche de celui de l'eau.

La répartition du massif de polyethylène apparaît en coupe sur la Figure 11.

Le détecteur est une chambre à ionisation LND 50312, associée à un préamplificateur PCC 1140, un amplificateur Preston, une source de haute tension. Le montage utilisé pour les mesures est décrit sur la Figure 13.

IV.2 Résultat des mesures

IV.2.1 Mesures de radioprotection

Des mesures de débit de dose ont été effectués avec une chambre à ionisation, avec une précision de l'ordre de 10 %.

Le débit de dose, à un mètre de l'axe de la sonde est inférieur à 4,5 mrad/h. A proximité de la paroi du calorifuge, la valeur maximum du débit de dose est de 40 mrad/h. Ces valeurs montrent que les blindages sont suffisants, le débit de dose dans le local ne sera pas augmenté de façon sensible.

IV.2.2 Détermination du taux de comptage équivalent

Bien que les mesures soient faites en courant, nous avons déterminé le taux de comptage équivalent (nombre d'interaction par seconde, valeur importante pour déterminer la précision statistique).

Cette évaluation a été effectuée à partir de la détermination de la densité spectrale de puissance.

La mesure a été faite à l'aide du montage représenté sur la Figure 13. Le dépouillement a été effectué sur l'analyseur en temps réel 5420 A de Hewlett-Packard.

On a, compte tenu de la précision quant à la détermination de $\bar{\tau}$:

$$\tau p = 1.25\ 10^{5}\ c/s$$

pour un courant de 770 mV ($R = 10^{10}\ \Omega$).

La section d'essai étant remplie de polyethylène de densité : 0.9478 g/cm3.

Le taux de comptage estimé par la méthode de flux sans choc est :

$$1.28\ 10^{5}\ c/s.$$

IV.2.3 Détermination de l'atténuation

L'atténuation est représentée par le rapport :

$$R\ (x,y) = \frac{\tau(x,y)}{\tau p}$$

ou $\tau(x,y)$ représente la réponse du détecteur lorsqu'un barreau situé en (x,y) est enlevé

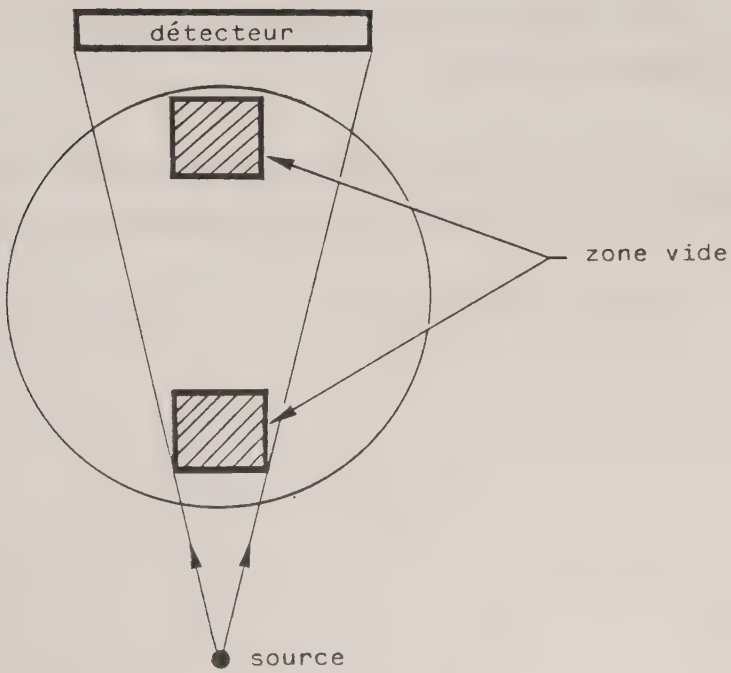
τp : Taux de comptage plein.

La Figure 14 montre la valeur de ce rapport en fonction du barreau enlevé.

Elle montre la zone de mesure prise en compte par le détecteur. La précision des mesures est de 3.5 ‰.

Si nous considérons la ligne verticale centrale en éliminant les valeurs du bord, R varie de 1.089 (bas) à 1.064 (haut).

L'augmentation de la variation lorsque l'on se rapproche de la source est due principalement à un effet géométrique, comme le montre le schéma ci-dessous.



En effet, si l'on corrige la variation du signal du bas par le rapport des surfaces interceptées, compte tenu de la précision sur le rapport des surfaces, la valeur du haut devrait être 1.066.

Pour éliminer cet effet (difficile à estimer par le modèle, compte tenu de sa grande sensibilité à la précision avec laquelle est connue la géométrie), nous avons représenté l'atténuation lorsque l'on enlève une zone de 5 barreaux. (chaque zone à la même importance géométrique dans le faisceau quelle que soit sa position).

Pour prendre en compte les dimensions du faisceau par le modèle, les sources ont été placées au niveau du détecteur, sur sa surface apparente, le point de calcul étant situé au niveau de la source.

L'atténuation Rth prédite par le formalisme d'atténuation en ligne droite est de Rth = 1.194 et indépendante de l'endroit ou est retirée la zone.

La Figure 15 donne d'une part la valeur mesurée de ce rapport, R_{exp}, en fonction de l'endroit ou a été enlevée une zone de 5 barreaux, et l'erreur relative commise en utilisant le modèle d'atténuation en ligne droite $\varepsilon = \frac{Rth - Rexp}{Rexp}$.

Les valeurs portées entre parenthèses ont été déduites des sommes effectuées à partir des valeurs des barreaux individuels.

Nous notons la bonne cohérence entre les mesures individuelles et les mesures globales.

Il y a un écart léger, mais croissant lorsque l'on s'écarte de la source, entre le formalisme d'atténuation en ligne droite et la mesure.

L'erreur relative varie de $3.4\ 10^{-3}$ à $7.5\ 10^{-3}$.

V. CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

L'étude précédente a permis de déterminer les caractéristiques du système de mesure qui a été implanté sur la centrale de DAMPIERRE.

Des essais préliminaires ayant pour but l'étalonnage du dispositif de mesure sont en ocurs.

Des mesures seront effectuées pour différents état de fonctionnement du réacteur (arrêt à chaud, déclenchement turbine, ilotage...), et comparées aux valeurs calculées d'après le paramètres permettant de connaitre l'état du circuit primaire (pression, températures des thermocouples dans la ligne, niveau pressuriseur...).

Dans une étape suivante, les mesures de débit et de température seront effectuées sur une période de un an.

REFERENCES SUR LA DEUXIEME PARTIE

/1/ C. DUPONT, JC. NIMAL

MERCURE IV : Un programme de MONTE-CARLO a trois dimensions pour l'intégration de noyaux ponctuels d'atténuation en ligne droite.
Rapport SERMA Juillet 1980

/2/ B. PAPIN, J. ROMEYER-DHERBEY

Mesures de débit et de puissance par Azote 16.
Etude des dispositifs de collimation.
Note Technique SEN/LPRE Juillet 1980

/3/ E. EIMECKE

Communications personnelles

/4/ MM. DUBAIL, FAVENNEC

Communications personnelles.

/5/ J. CRAY, J. ROMEYER-DHERBEY, G. FACHERIS

Mesure de température et débit sur la ligne d'expansion du pressuriseur méthode et dispositif expérimental.
Note Technique SEN/LPRE

/6/ J. CRAY, J. ROMEYER-DHERBEY, G. FACHERIS

Mesure de température et de débit sur la ligne d'expansion du pressuriseur expériences réalisées sur maquette.
Note Technique SEN/LPRE Février 1982

3 ème P A R T I E

MESURE DU NIVEAU PRESSURISEUR PAR

TRANSMISSION DE RAYONNEMENTS

I. INTRODUCTION

La mesure du niveau pressuriseur par transmission de rayonnements permettrait de fournir une information complémentaire et redondante particulièrement utile dans certaines conditions de fonctionnement (transitoires de grande amplitude, incidents).

Elle permettrait de calibrer et compléter les mesures actuelles par ΔP qui posent parfois des problèmes de représentativité (dérive, hysteresis, inaptitude à déceler d'éventuelles conditions diphasiques).

La mesure par transmission fournissant une image de la densité moyenne de l'eau le long d'un diamètre, l'information fournie correspond donc à une estimation de la masse d'eau réelle contenue dans le pressuriseur.

La mise en oeuvre de cette technique sur réacteur est simple, ne nécessite pas d'intervention sur le métal du pressuriseur, et pourrait s'appliquer à des réacteurs déjà en exploitation.

II. PRINCIPE DE LA MESURE DU NIVEAU

Le principe de cette mesure est de placer une source émettant des particules énergétiques, et de compter celles traversant le pressuriseur, sur des détecteurs disposés régulièrement le long de sa hauteur (Figure 18).

Avec une bonne approximation, le taux de comptage d'un détecteur est une fonction décroissante du nombre de molécules d'eau rencontrés sur le trajet en ligne droite de la source au détecteur (Cf. Première Partie).

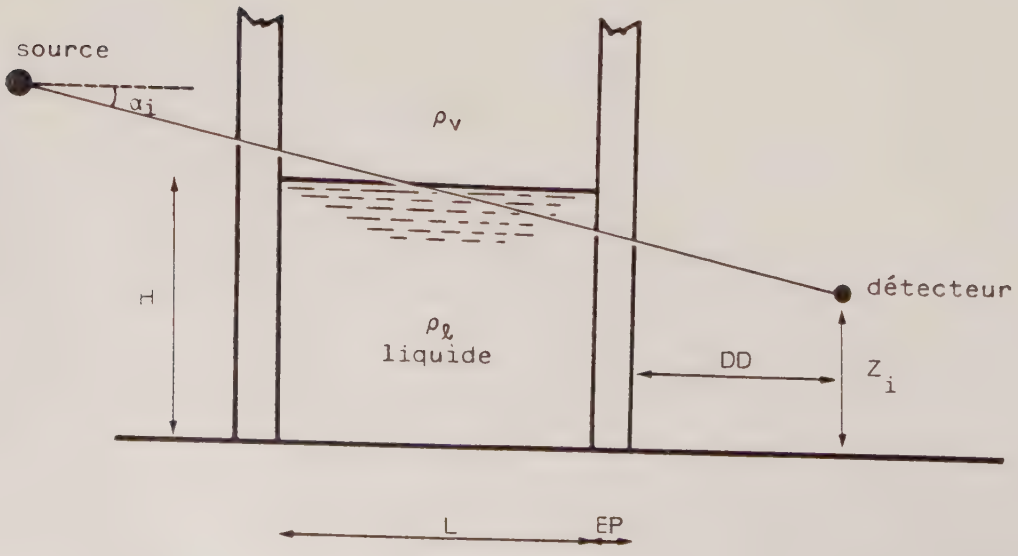
Il est donc possible, par cette méthode, d'estimer la densité d'eau mesurée par un détecteur, à la cote Zi par :

$$\langle\rho\rangle_i = \frac{\text{Log}\,(\tau_i) - \text{Log}\,(\tau_{i1})}{\text{Log}\,(\tau_{i2}) - \text{Log}\,(\tau_{i1})} \cdot (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 \qquad (1)$$

ou τ_{ik} représente le taux de comptage obtenu lors d'une mesure de calibration, pour un détecteur placé à une cote Zi, l'eau étant à une densité ρ_k déterminée.

Si un détecteur mesure une masse volumique moyenne $\langle\rho\rangle i$ comprise entre ρ_ℓ et ρ_v, le niveau est déterminé par :

$$H = Z_i + \text{Ltg}\alpha_i \left(\frac{\langle\rho\rangle_i - \rho_v}{\rho_\ell - \rho_v} + DD + EP \right) \qquad (2)$$



Dans une configuration accidentelle, où le pressuriseur serait rempli d'un mélange diphasique, sans interface eau-vapeur, l'instrumentation permettrait d'estimer la masse d'eau dans le pressuriseur.

Il est nécessaire de satisfaire au mieux aux conditions suivantes :

- Comptage suffisamment élevé pour avoir une précision statistique correcte.
- Faible influence des autres sources de rayonnement.
- Sensibilité suffisante aux variations de niveau.

Nous allons estimer ces différents points dans le paragraphe suivant.

III. TRANSMISSION DE GAMMA

III.1 Description du montage

La géométrie utilisée pour les calculs est représentée sur la Figure 19.

La source est du Cobalt 60, d'activité 500 Ci.

Les détecteurs sont à 120 cm de la paroi, protégés par un bloc de plomb de 7,5 cm d'épaisseur et de 20 cm de long. Les dimensions de la fenêtre de collimation sont de 5 x 5 cm.

III.2 Modèle de calcul

Le flux dû à la source de Cobalt, au niveau d'un détecteur, a été estimé à l'aide de la formule (1) (Première Partie).

Les contributions des sources parasites ont été estimées à l'aide du code MERCURE IV. La modélisation est analogue à celle utilisée pour la ligne d'expansion (Figure 3).

III.3 Flux dû à la source

La Figure 20 montre la répartition axiale du flux sans choc, au niveau des détecteurs, en fonction de la position du niveau, pour la géométrie considérée sur la Figure 19, et une source de 500 Ci de Co^{60}.

Soit pour un détecteur placé face à la source, à la même hauteur.

$$\phi_v = 5.68\ 10^2 \quad \gamma cm^{-2}s^{-1} \text{ en phase vapeur.}$$
$$\phi_\ell = 0.77 \quad \gamma cm^{-2}s^{-1} \text{ en phase liquide.}$$

L'enveloppe supérieure de la courbe représente la variation du flux, en phase vapeur, en fonction de la position du détecteur. Lorsque l'on s'éloigne de part et d'autre du détecteur situé face à la source, la distance source-détecteur et les trajets parcourus dans les différents milieux augmentent, entraînant une diminution du flux.

III.4 Sources parasites

Différents émetteurs γ peuvent influencer le taux de comptage.

Il s'agit essentiellement :

- Des dépôts de produits de corrosion à la surface interne du pressuriseur.
- Des produits de corrosion en solution.
- Des produits de fission liés soit à la contamination initiale des gaines lors de la fabrication, soit à des ruptures de gaines.

1) Emetteurs γ déposés sur les tuyauteries

Les valeurs d'activité déposées sur la paroi interne du pressuriseur ont été prises à : /1/

Pour le Co^{58}	47 µCi/cm²
Pour le Co^{60}	15 µCi/cm²

Ces valeurs doivent être des majorants de l'activité déposée réelle en exploitation normale.

Ces dépôts sont pris en compte dans le modèle sous la forme d'une source volumique répartie dans une couronne de faible épaisseur à la surface interne de la tuyauterie, à une énergie moyenne de 1 MeV, pour une activité totale de 5.6 10^6 $\gamma/cm^3/s$. Leur contribution au flux est de 62 $\gamma cm^{-2}s^{-1}$. L'utilisation d'un collimateur quadrillé (Figure 21) permettrait de minimiser cet effet (chaque surface élémentaire émettrice de la paroi n'éclaire que la surface en regard du détecteur).

Pour un détecteur collimaté suivant le schéma de la Figure 21, l'estimation devient

$$\tau \text{ dépôt} = 0.5 \ \gamma \ cm^{-2}s^{-1}$$

2) Emetteurs gamma en solution dans l'eau

A. Produits de corrosion en solution

Les valeurs d'activité de l'eau du pressuriseur ont été prises à : /1/.

Pour le Cobalt 58 2 mCi/T
Pour le Cobalt 60 0.5 mCi/T

Leur contribution au flux, avec la collimation quadrillée est de 8.2 10^{-3} γ cm^{-2} s^{-1} et peut être négligée par rapport au flux dû à la source.

B. Produits de fission

Nous avons pris une hypothèse majorante en considérant que l'activité volumique relachée dans le circuit primaire en cas de ruptures de gaines se retrouvait intégralement dans la phase liquide du pressuriseur.

Deux cas extrêmes ont été considérés, en fonctionnement normal et accidentel.

1 - 0.25 % de ruptures de gaines. /2/

- Taux de fuite moyen $10^{-4} s^{-1}$ (fissures de faible dimensions), ceci conduisant à un piégeage des iodes. Cette situation correspond actuellement aux limites de pollution admises en fonctionnement normal.

2 - 100 % de ruptures de gaines /3/

Les produits de fission contenus dans le jeu combustible gaine sont relâchés dans le fluide primaire. Le tableau suivant donne l'activité dans l'eau, et le flux au niveau du détecteur, en fonction de l'énergie, selon le découpage utilisé dans MERCURE IV.

ENERGIE MOYENNE (MeV)		3.12	2.5	2	1.5	1	0.63	0.42
A C T I V I T E ($\gamma/cm^3/s$)	0.25 %	4.110^2	1.710^4	1.110^4	1.810^4	1.210^4	2.510^4	8.10^4
	100 %	3.110^6	2.8810^7	6.110^7	1.810^8	1.410^8	2.10^8	1.110^9
F L U X ($\gamma/cm^2/s$)	0.25 %	3.88	1.1610^2	4.7210^1	2.9910^1	7.02	2.55	0.96
	100 %	2.9410^4	1.9210^4	2.6210^5	2.9910^5	8.1910^4	2.0410^4	1.3210^4

On voit que dans le cas où des gaines sont ruptées, les valeurs des taux de comptage dus aux produits de fission sont telles que la collimation quadrillée serait insuffisante.

La détection de la mesure du niveau, dans ces conditions, nécessiterait d'utiliser une source pulsée permettant d'extraire le signal du bruit ambiant (Cf. Annexe 2).

Un autre moyen permettant de diminuer l'influence des produits de fission serait de travailler en impulsion et de faire de la discrimination d'amplitude.

Cette méthode n'est possible que si le taux de comptage total ne dépasse pas une valeur de l'ordre de 4 10^5 coups/s.

Cette limitation, due au temps mort de comptage (Cf. 1ère Partie), fait que la méthode ne serait applicable que jusqu'à un pourcentage de ruptures de gaines de l'ordre de 50 %.

III.5 Estimation de la précision de la méthode

Abstraction faite des sources parasites, l'erreur commise sur la mesure du niveau dépend des paramètres suivants :

- Erreur statistique
- Erreur sur l'estimation des masses volumiques du liquide (ρ_ℓ) et de la vapeur (ρ_v)
- Espacement des détecteurs
- Cotes physiques de l'installation
- Stabilité des détecteurs

Les calculs de l'influence de ces paramètres sur le niveau ont été effectués avec :

- détecteurs espacés de 20 cm
  (distance minimum possible, compte tenu de la protection des détecteurs)

- temps d'intégration 10 s

- détecteur de 5 cm de diamètre, de rendement 0.7.

III.5.1 Erreur statistique

Cette erreur, due à la statistique de comptage, est représentée sur la courbe 1 de la Figure 22.

(1) et (2) donnent $dh = \dfrac{\sin\alpha_i}{(\rho_\ell - \rho_v) \cdot \sigma} \cdot \dfrac{\Delta_{\tau i}}{\tau i}$

Les "oscillations" proviennent du fait que lorsque plusieurs détecteurs mesurent un niveau, la valeur qui a été retenue est celle de celui ayant le plus fort taux de comptage.

La variation maximum de hauteur d'eau mesurée par un détecteur est :

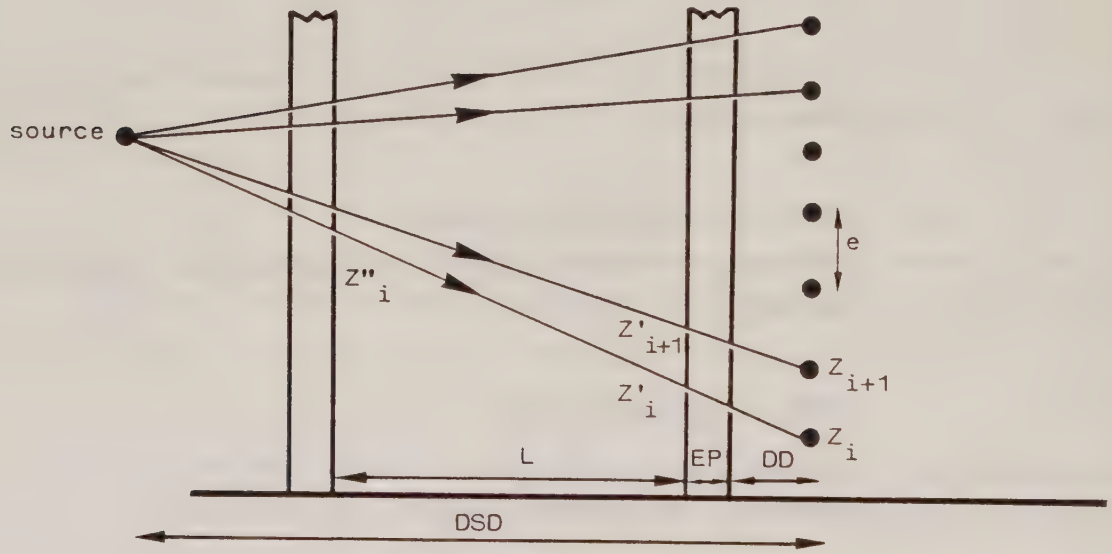
$$Z'_{i+1} - Z'_i = e\left(1 - \frac{DD+EP}{DSD}\right) \qquad (3)$$

quand le niveau est inférieur à la source

et $$Z''_{i+1} - Z''_i = e\left(1 - \frac{DD+EP+L}{DSD}\right) \qquad (4)$$

quand le niveau est supérieur à la source

Soit dans le cas considéré $Z'_{i+1} - Z'_i = 13.5$ cm
$Z''_{i+1} - Z''_i = 2.8$ cm



Quand l'angle entre la source et le détecteur diminue, pour une même variation de hauteur d'eau le trajet parcouru dans l'eau est plus important, entraînant une diminution du taux de comptage, donc une augmentation de l'erreur.

Cet effet est diminué par l'augmentation du taux de comptage par effet d'angle solide, comme le montre l'enveloppe supérieure de la courbe de la Figure 20.

III.5.2 Erreur sur l'estimation de $\rho\ell$ et de ρv

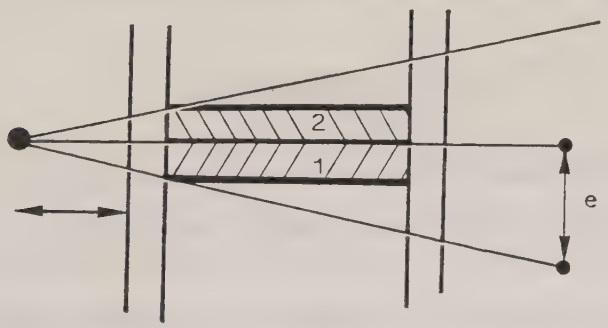
Les courbes 2 et 3 de la Figure 22 montrent l'influence d'une erreur de 1 % respectivement pour le liquide et la vapeur. L'erreur sur ρ_v pourrait être diminuée, en l'estimant à partir des valeurs données par les détecteurs situés au-dessus du niveau. Le taux de comptage en phase liquide est trop faible pour permettre une précision acceptable avec un temps de réponse faible.

La valeur considérée plus haut correspond à une estimation de l'erreur pouvant être commise en calculant la masse volumique du liquide d'après la connaissance de la pression et du fonctionnement des chauffe-rettes.

III.5.3 Erreur liée à l'espacement des détecteurs

La Figure 23 montre la somme des erreurs précédentes.

Au voisinage de la source existe une zone où le niveau est indéterminé (zone hachurée de la Figure ci-dessous).



Un détecteur situé face à la source permet de déterminer si le niveau se trouve dans la région (1) ou (2).

La zone d'indétermination est :

$$\Delta H = \frac{DS + EP}{DSD} \times e$$

Soit dans le cas considéré $\Delta H = 3$ cm.

En dehors du voisinage de la cote de la source, les relations (3) et (4) montrent que la variation de niveau mesurée par un détecteur est proportionnelle à l'espacement entre les détecteurs.

L'examen de la courbe 1 de la Figure 22 montre que le dernier détecteur situé au-dessus de la source mesure le niveau sur une hauteur de l'ordre de 80 cm, sans que cela n'entraîne une erreur trop importante.

En dehors du voisinage de la cote de la source, un espacement des détecteurs de l'ordre de 50 cm ne devrait pas entraîner d'erreur supérieure à 2 cm. (Dans la gamme de niveau considérée).

La mesure de la totalité de la gamme de variation du niveau, avec une égale précision nécessiterait d'utiliser deux systèmes source-détecteurs.

III.5.4 Erreur sur les cotes physiques de l'installation

Cette erreur est liée à la précision avec laquelle sont évaluées les cotes de l'installation, précision qui, moyennant l'emploi d'une métrologie de précision peut être excellente.

III.5.5 Dérive, hysteresis

Les détecteurs sont sensibles aux variations de température (de l'ordre de 1‰/°C pour un ensemble scintillateur-photomultiplicateur).

Une variation de comptage de 1% entraînerait une imprécision maximum inférieure à 2 mm sur le niveau.

Des chambres à ionisation sont moins sensibles à cet effet mais ne permettent pas de discriminer en énergie.

III.5.6 Mesure du niveau pendant un transitoire

On mesure le signal I sur une certaine période δ.

En cas de transitoire, on mesure en fait :

$$Iap = \frac{1}{\vartheta} \int_{o}^{\vartheta} I(t)\, dt = K_i\, e^{-a_i hi(t)}$$

$$a_i = \frac{\sigma(\rho_\ell - \rho_v)}{\sin\alpha_i} \qquad K_i = e^{-\sigma p_v / \sin\alpha_i}$$

La valeur moyenne d'une exponentielle n'étant pas égale à l'exponentielle de la valeur moyenne, on ne mesure pas une valeur moyenne du niveau. L'erreur est plus faible quand le niveau décroit que quand le niveau croît à partir d'une position de référence.

Exemple : Variation linéaire du niveau

Ir : Signal mesuré si le niveau était h au temps ϑ
Iapp : pendant que le niveau varie de h(o) à h(ϑ).

L'erreur commise est $\varepsilon = 1 - \frac{Ir}{Iapp}$

1 - $h(t) = ho - vt$ $\qquad \varepsilon_1 = 1 - \frac{1 - e^{-a_i v\vartheta}}{a_i v\vartheta}$

2 - $h(t) = ho + vt$ $\qquad \varepsilon_2 = 1 - \frac{e^{a_i v\vartheta} - 1}{a_i v\vartheta}$

Les variations de température de l'eau primaire provoquées par le déplacement des grappes de réglage, Xénon, Bore, entraînent une variation de volume de 1.7 m^3/mn au maximum.

Pendant ce transitoire, l'imprécision sur la mesure du niveau serait au maximum de 2 cm pour un temps d'intégration de 10 secondes.

III.6 Détection de fuites

La présence de fuites dans le circuit primaire entraîne une variation du niveau du pressuriseur.

Les conditions de sécurité imposent de détecter dans un temps maximal d'une heure une fuite de 230 Kg.

Cela correspond à une variation de niveau de 1.53 mm/mn. La variation du signal d'un détecteur permet de remonter à la variation du niveau par $dh = \frac{\sin\alpha i}{\sigma(\rho\ell-\rho v)} \frac{dI}{I}$.
à condition que la variation du signal due à la variation du niveau soit supérieure à 2 écarts types de l'erreur statistique.

La variation minimale détectée, pour un détecteur donné, dépend de la constante de temps utilisée comme le montre le tableau ci-dessous.

ϑ(s)	1	10	60	240
Δ (dh) (mm)	12	4	1.6	0.8

Pour une durée de l'ordre de 5 mn, la dérive des détecteurs du fait de la température peut être considérée comme négligeable.

- Erreur due à la variation de masse volumique

$$\Delta(dh) = \frac{\partial(dh)}{\partial\rho\, v} d\rho v + \frac{\partial(dh)}{\partial\rho\ell} d\rho\ell$$
$$= dh \left(\frac{d\rho v + d\rho\ell}{\rho\ell - \rho v} \right)$$

Pour $\frac{d\rho v}{\rho v} = \frac{d\rho\ell}{\rho\ell} = 10^{-2}$ nous avons

$$\frac{\Delta(dh)}{dh} = 1.4\ 10^{-2}$$

En prenant un temps d'intégration de 4 mn, le niveau aurait baissé de 6 mm, d'où

$$\Delta(dh) = 8.2\ 10^{-2} \text{ mm}$$

Une fuite de 230 Kg/heure pourrait donc être détectée au bout de 8 mn.

III.7 Remarques sur la transmission de neutrons

Les remarques de la première partie montrent que seuls des neutrons de haute énergie pourraient être utilisés.

Le flux rapide dû aux neutrons arrivant sans choc peut s'exprimer par :

$$\phi = \frac{S}{4\pi D^2} \quad \exp. \{\Sigma acier.xacier + \Sigma eau.xeau\}$$

avec

S	Nombre de neutrons émis par la source.
D	Distance source-détecteur.
Σacier	Section efficace macroscopique de l'acier.
Σeau	Section efficace macroscopique de l'eau.

Soit, pour des neutrons de 14 MeV émis par un générateur utilisant la réaction Deutérium - Tritium, d'intensité 10^{10} neutrons/s dans 4 Π,

$\phi\ell = 8.9\ 10^{-4}\ cm^{-2}\ s^{-1}$ en phase liquide
$\phi v = 6.3\ 10^{1}\ cm^{-2}\ s^{-1}$ en phase vapeur

Pour un détecteur diamétralement opposé à la source, à la même hauteur, la source et le détecteur étant chacun à 30 cm de la paroi.

En considérant qu'après avoir traversés le pressuriseur, les neutrons rapides transmis sont thermalisés avec un rendement de 30 % avant d'arriver sur un détecteur à dépôt de bore ayant une sensibilité de 12 coups/n $cm^{-2}\ s^{-1}$ (type CPNB30), on aurait un taux de comptage de

$\tau_L = 3.20\ 10^{-3}\ s^{-1}$ en phase liquide.
$\tau_V = 2.25\ 10^{2}\ s^{-1}$ en phase vapeur

La plus grande sensibilité aux variations de niveau implique que pour avoir une précision identique à la méthode utilisant les gamma, l'espacement entre les détecteurs devrait être réduit, ou le temps d'intégration augmenté. La principale limitation est la durée de vie faible de la source, ne permettant pas d'utiliser la méthode en continu.

Par contre, elle ne nécessite pas de protections permanentes, l'émission de neutrons pouvant être arrêtée à volonté.

IV. CONCLUSION DE LA 3EME PARTIE

La méthode par transmission de gammas émis par une source intense de Co^{60} semble adaptée à une mesure continue du niveau et de la masse d'eau dans le pressuriseur.

L'utilisation d'une collimation quadrillée optimisée, réduisant la contribution des dépôts de corrosion devrait permettre de mesurer avec une bonne précision le niveau en fonctionnement normal.

La détermination du niveau et/ou de la masse d'eau dans le pressuriseur dans le cas où un nombre important de gaines sont ruptées, nécessiterait d'effectuer des comptages avec sélection d'amplitudes (jusqu'à 50 % de ruptures) ou de moduler la source.

La méthode utilisant les neutrons peut être intéressante pour calibrer une instrumentation à l'aide d'un montage amovible, permettant de détecter la présence d'une des phases à une cote donnée.

Le tableau ci-dessous résume les performances du système gamma, dont les caractéristiques principales sont :

- source de 500 Ci de Co^{60},
- espacement des détecteurs : 20 cm,
- gamme de mesure 5 m,
- temps de réponse < 15 s.

TYPE DE FONCTIONNEMENT	PARTICULARITES	ERREUR MAXIMALE
NORMAL	Collimateur "quadrillé"	< 1 cm
NORMAL LIMITE	Collimateur "quadrillé" + modulation de source	< 1.2 cm
ACCIDENTEL		< 2 cm

Un espacement des détecteurs de 50 cm ne devait pas entraîner d'erreurs supérieures à 5 cm (dans la gamme de niveau considéré).

REFERENCES SUR LA TROISIEME PARTIE

/1/ E. EIMECKE

Communications personnelles.

/2/ C. LEUTHROT - J.J. SEVEON

"Calcul de l'activité des produits de fission dans l'eau primaire à l'aide du code PROFIP-3 pour un réacteur PWR de 900 MWE"
note CEA SERS Novembre 1976

/3/ C. LEUTHROT - A. LALET

Communications personnelles

/4/ P. BERNARD - J. BOUCHARD

Procédé et dispositif de mesure du niveau d'un liquide dans une enceinte.
Brevet N° 7922218 - 5/09/1979

/5/ P. BERNARD - Ch. MESSAINGUIRAL

Mesure du niveau d'un pressuriseur utilisant la propagation de particules énergétiques.
Note Technique SEN/LPRE Juin 1979

4 E M E P A R T I E :

MESURE DE LA MASSE D'EAU DANS LA CUVE, APRES ARRET DU REACTEUR, PAR DETECTION DES GAMMA EMIS PAR LE COMBUSTIBLE

I. INTRODUCTION

Cette étude a été inspirée par l'accident de TMI (/7/) qui aurait pu être moins sévère si des instrumentations avaient permis d'estimer la masse d'eau dans la cuve, après arrêt du réacteur, permettant d'aider à entreprendre des actions appropriées.

Dans la première partie nous présentons une étude qualitative de dépressurisation du circuit primaire et une présentation de différentes méthodes possibles ainsi que des études antérieures.

Nous présentons dans la suite, l'étude théorique d'une méthode permettant d'estimer la masse d'eau dans la cuve, utilisant la variation de la transmission des gamma suivant l'épaisseur d'eau située au dessus du sommet du coeur.

II. NIVEAU CUVE ET CONDITIONS DIPHASIQUES

II.1 Description qualitative du phénomène

En cas de dépressurisation, des conditions diphasiques peuvent apparaître dans le circuit primaire et dans la cuve du réacteur.

Le circuit primaire continuant à perdre de l'eau, des conditions diphasiques peuvent apparaître dans des régions de la cuve du réacteur où la température est élevée (Figure 24).

- Au dessus du coeur (Région B) et dans le plénum supérieur (Région A) pour les réacteurs Fessenheim et Bugey (la température du plénum supérieur est proche de la température de sortie).

- Uniquement au dessus du coeur, pour les réacteurs du CP1 (la température du plénum supérieur est proche de la température d'entrée).

Les régions A et B communiquant uniquement entre les points 1 et 2 des tubes guides, les bulles resteront dans la Région B.

En cas de croissance des bulles dans la Région B, la circulation du fluide primaire serait fortement perturbée.

Les principaux états pouvant se rencontrer dans le cas du circuit primaire diphasique sont :

1. Faiblement dégradé

   Circulation naturelle. Ebullition dans la branche chaude. Thermosyphon stable pour un taux de vide (α) compris entre 0.3 et 05.
   Si α augmente : rupture du thermosyphon ; si $\alpha \rightarrow 1$: possibilité de retour d'eau condenseur depuis les générateurs de vapeur, stratification horizontale.

2. Inventaire en eau plus dégradée ($\alpha > 0.3$ à 0.5) plus de thermosyphon.
   Circulation contre courant branche chaude. Le niveau d'eau se trouve entre la branche chaude et le haut du combustible.

3. Si l'environnement est encore plus dégradé, il n'y a plus de circulation du tout.

II.2 Méthodes envisageables pour détecter des conditions diphasiques dans la cuve du réacteur

Dans le tableau suivant, nous donnons une liste de méthodes envisageables pour mesurer le niveau dans la cuve, et détecter des conditions diphasiques, en accord avec les objectifs suivants :

1. Détection de bulles dans la partie supérieure du coeur

   1.A - Détection de bulles dans la Région A
   1.B - Détection de bulles dans la Région B

2. Détection du dénoyage des tubulures.

3. Détection de l'assèchement du coeur.

4. Estimation de la masse d'eau dans la cuve.

OBJECTIF	METHODE		REMARQUES
1.A Détection de bulles dans la région A	METHODES NON INTRUSIVES	1.A.1 Ultrasons 1.A.2 ΔP 1.A.3 Transmission de neutrons 1.A.4 Détecteur gamma	Indication discontinue nécessite des modifications des matériaux
	1.A.5 Méthodes intrusives		Modifications des matériaux
1.B Détection de bulles la région B	1.B.1 ΔP 1.B.2 Méthodes intrusives (résistivité, etc) 1.B.3 Détecteur gamma		
2. Détection de conditions diphasiques dans la branche chaude	2.1 Ultrasons 2.2 Détecteur gamma		Faibles taux de vide
3. Assèchement du coeur	3.1 Thermomètres gamma ou ensemble de thermocouples 3.2 Détecteur in core		
4. Estimation de la masse d'eau dans la cuve	1.B.3 + 3.1		3.1 Mesure discontinue 1.B.3 Mesure continue

1.A.1 Ultrasons

Différentes méthodes sont possibles, utilisant un ou plusieurs capteurs en réflexion ou en transmission. Des difficultés d'interprétation peuvent se produire pour des taux de vide élevés.

1.A.2 ΔP

Mesures de pression entre le sommet de la cuve et un point inférieur.
Cette méthode nécessite des modifications des structures.

1.A.3 Transmission de particules

Une méthode de mesure du niveau d'eau dans le plénum supérieur par transmission de neutrons a été étudiée par Paul KEHLER /1/. Il montre, par une étude théorique, qu'il serait nécessaire d'introduire un détecteur de neutrons à l'intérieur du dome et d'utiliser un générateur de neutrons pour obtenir des taux de comptage suffisants.

1.A.5 Méthodes intrusives

Il existe un ensemble de méthodes possibles nécessitant d'introduire des capteurs dans la cuve (mesures de résistivité de l'eau, thermocouples).

1.B.1 ΔP

Mesure de différence de pression entre le sommet de la cuve et les branches chaudes.
Cette méthode nécessite des modifications des structures.

2.1 Ultrasons

Mesure limitée aux faibles taux de vide.

2.2 Transmission de particules à travers la branche chaude

Cette méthode est étuidée dans la 5ème Partie.

3.1 Mesures de température

La méthode consiste en un ensemble de thermocouples, installés à différentes positions axiales, et comprennent une partie chauffée par les gamma.

La modification des conditions d'échange de chaleur, et donc la distribution axiale de température, due aux variations du niveau devait permettre de mesurer le niveau.

Les thermomètres gamma, utilisés comme l'instrumentation "in core" devrait donner des informations similaires.

3.2 Détecteur "in core"

Des mesures de taux de vide à l'aide de neutrons ont eu lieu "in core" pour le contrôle de la puissance et de la stabilité de fonctionnement d'un BWR.

Untermeyer et Al (/2/) proposèrent de mesurer les bulles de vapeur dans le coeur du réacteur expérimental de Valleicitos par une mesure du rapport du flux rapide au flux thermique.

THIE et Al (/3/) confirmèrent cette méthode et montrèrent l'existence théorique d'une relation linéaire entre le rapport $\frac{\emptyset th}{\emptyset r}$ et la densité locale d'hydrogène.

Untermeyer (/4/) proposa l'utilisation d'un détecteur de neutrons rapides, placé au dessus d'un canal pour contrôler le débit de vapeur d'un canal. Enfin, plus récemment, KEHLER (/1/), proposa de mesurer le niveau d'eau dans le coeur d'un PWR, après chute des barres par la mesure du rapport du nombre de neutrons prompts de fission au nombre de neutrons retardés, au moyen de détecteurs in core, en utilisant une source extérieure pulsée de neutrons.

1.B.3. + 4 Détecteur gamma

Un détecteur gamma (collimaté et protégé), situé au dessus de la cuve, observe la variation du flux gamma, en fonction du niveau d'eau dans la cuve (Figure 23).

Des essais préliminaires effectués sur le réacteur CAP à Cadarache (dans une configuration géométrique assez différente) ont montré une variation significative du taux de comptage en fonction du niveau d'eau (Figure 25). Cette méthode a été retenue et est décrite dans les paragraphes suivants.

III. PRINCIPE DE LA METHODE GAMMA

Le principe est d'utiliser les gamma provenant d'émetteurs situés dans la cuve comme source, et d'observer le taux de comptage d'un détecteur placé au dessus de la cuve, qui dépend de la masse d'eau entre le coeur et le sommet de la cuve (Figure 24).

Les différentes sources de gamma proviennent :

- Des produits de fission du coeur (confinés dans les aiguilles combustibles).
- Des dépôts de corrosion et d'activation.
- Des produits de fission en solution dans l'eau (provenant de ruptures de gaines).

Le taux de comptage peut s'écrire de manière simplifiée :

$$\tau = \tau_{coeur} + \tau_{dépot} + \tau_{activation} + \tau_{primaire}$$

$$\tau_i = S_i(t) \int \chi_i(E)\, f_i(\ell,E)\, \varepsilon(E)\, dE = S_i(t)\, F_i(\ell,E)$$

avec :

$S_i(t)$ Valeur globale de la source pour chaque source considérée (i = coeur, dépot, Activation .....)

$\chi_i(E,t)$ Spectre de la source.

$f_i(\ell,E)$ Fonction décrivant la transmission des particules d'énergie E, le niveau étant à la position ℓ, pour une distribution spatiale de source i.

$\varepsilon(E)$ Efficacité du détecteur à l'énergie E.

REMARQUES

τdépot peut se décomposer en τcuve + τinternes.

τcuve correspondant aux dépôts de corrosion situés sur la surface du couvercle de la cuve ne dépend pas du niveau.

τprimaire qui correspond à l'activité de l'eau du circuit primaire peut être important en cas de rupture de gaines, et diminue avec le niveau.

Le spectre $\chi_A(E)$ des émetteurs d'activation ne dépend pas du temps.

Pour un temps de quelques secondes à plusieurs heures après arrêt du réacteur, l'intensité des produits de fission décroit (Figure 30).

Il est nécessaire d'utiliser un second détecteur placé latéralement, qui mesure la variation globale de l'activité gamma du coeur.

D'autre part, la partie des barres de commandes située au dessus de la cuve, émet des gamma (à cause de l'activation dans le coeur). Il est nécessaire de protéger le détecteur, afin d'éviter que cette contribution soit supérieure à celle du combustible.

IV. CALCUL DES DIFFERENTES CONTRIBUTIONS AU FLUX APRES ARRET DU REACTEUR

IV.1 Modèle de calcul

Les calculs ont été effectués à l'aide du code MERCURE IV.

IV.2 Modélisation de la géométrie du réacteur

Nous avons considéré un détecteur, collimaté selon un angle de 23° et placé à 30 cm au-dessus du couvercle de la cuve, dans une région ou ne se trouvent pas de bancs de controle (Figure 40). Cette collimation a été choisie de façon à limiter les contributions des sources autres que celles provenant du coeur.

La symétrie du problème nous a permis de décrire la moitié de la partie comprise dans l'angle de visée du détecteur (Figures 26 et 27).

IV.2.1 Internes supérieurs

Sont décrits : Les tubes guides et les barres de commande.
La plaque support des tubes guides.
Le couvercle de cuve.
La collimation du détecteur.

La Figure 26 montre la région qui a été décrite, correspondant à la partie visée par le détecteur au niveau de la plaque support des tubes guides.

La Figure 28 montre la modélisation des tubes guides par rapport aux structures réelles données sur la Figure 29. Les parois ajourées ont été considérées comme homogènes, avec une masse volumique équivalente pondérée par les volumes d'eau et de fer.

IV.2.2 Région comprise entre la plaque supérieure de coeur et la plaque support des tubes guides

Cette région a été décomposée en 2 zones (Figure 27).

. Une zone où sont décrits :

- Les tubes guides et les barres de commande,
- Les entretoises,
- La plaque supérieure du coeur.

La représentation des tubes guides dans cette région est identique à celle décrite précédemment. Les Figure 28 et 29 montrent le modèle décrit et les structures réelles.

. Une zone homogénéisée, où nous avons utilisé un coefficient d'atténuation moyen pondéré par les volumes d'eau et de fer (et donc dépendant du niveau) ainsi que pour la plaque supérieure de coeur dans cette région.

La Figure 27 montre la partie décrite, correspondant à la région visée par le détecteur au niveau de la plaque supérieure de coeur.

IV.2.3 Entretoisonnement

La région comprise entre le combustible et la plaque supérieure de coeur a été homogénéisée. Nous avons considéré un coefficient d'atténuation moyen pondéré par les volumes d'eau et de fer.

IV.2.4 Combustible

Compte tenu de la géométrie du problème (détecteur à 5.2 m au dessus du combustible, angle de 23°) le combustible a été considéré comme un bloc homogène d'UO_2, d'enrichissement 3.25 %.

IV.3 Flux sans choc dû aux produits de fission du coeur

IV.3.1 Sources

Les sources proviennent des gamma émis par les produits de fission du coeur après arrêt du réacteur.

Nous avons considéré une bande en énergie allant de 3.50 MeV à 1.25 MeV, selon le découpage en énergie utilisé dans MERCURE IV, des calculs préliminaires ayant montré qu'au dehors de cette gamme la contribution des PF pouvait être négligée.

La Figure 31 montre que le spectre varie peu en fonction du taux de combustion. Les sources ont été réparties de façon homogène dans le combustible (en respectant les volumes d'eau) pris à un taux de combustion de 22000 MWJ/T.

IV.3.2 Résultats

Les calculs ont été effectués pour différents niveaux d'eau selon les deux configurations discutées en II.1.

A. Plénum supérieur plein

- Niveau au voisinage du haut des tubulures d'arrivée d'eau,
- Niveau au voisinage du bas des tubulures d'arrivée d'eau,
- Niveau au sommet du combustible.

B. Le niveau décroit depuis le haut de la cuve

- Niveau maximum,
- Plaque support des tubes guides,
- Haut des tubulures,
- Bas des tubulures,
- Sommet du combustible.

Les résultats sont donnés dans les tableaux 2 à 4 pour des temps de 100 s, 5 H, et 24 H après arrêt du réacteur.

Les Figures 32 à 35 montrent l'évolution du flux, en fonction du temps après arrêt du réacteur selon les deux configurations.

TABLEAU 2

FLUX SANS CHOC AU NIVEAU DU DETECTEUR POUR DIFFERENTS NIVEAUX 100 s APRES ARRET DU REACTEUR

CONFIGURATION	FLUX PAR GROUPES γ cm^{-2} s^{-1}					NIVEAU
	1	2	3	4	TOTAL	
PLENUM SUPERIEUR PLEIN	$1.34\ 10^{-4}$	$3.73\ 10^{-3}$	$2.57\ 10^{-2}$	$1.19\ 10^{-1}$	$1.49\ 10^{-1}$	PLEIN
	$6.69\ 10^{-2}$	$7.54\ 10^{-1}$	2.93	8.89	$1.26\ 10^{-1}$	HAUT DES TUBULURES
	$3.13\ 10^{1}$	$1.79\ 10^{1}$	$5.69\ 10^{1}$	$1.21\ 10^{2}$	$2.27\ 10^{2}$	BAS DES TUBULURES
	$6.33\ 10^{1}$	$2.75\ 10^{2}$	$5.99\ 10^{2}$	$9.72\ 10^{2}$	$1.91\ 10^{3}$	SOMMET DU COEUR
LE NIVEAU DECROIT DEPUIS LE SOMMET DE LA CUVE	$1.27\ 10^{-1}$	3.57	$1.19\ 10^{1}$	3.10^{1}	$4.58\ 10^{1}$	SUPPORT DES TUBES GUIDES
	$9.67\ 10^{1}$	$3.64\ 10^{2}$	$7.59\ 10^{2}$	$1.21\ 10^{3}$	$2.43\ 10^{3}$	HAUT DES TUBULURES
	$4.45\ 10^{3}$	$9.76\ 10^{3}$	$1.49\ 10^{4}$	$1.64\ 10^{4}$	$4.56\ 10^{4}$	BAS DES TUBULURES
	$8.7\ 10^{4}$	$1.33\ 10^{5}$	$1.58\ 10^{5}$	$1.34\ 10^{5}$	$5.12\ 10^{5}$	SOMMET DU COEUR

GROUPE 1 : 1.25 - 1.75 MeV
GROUPE 2 : 1.75 - 2.25 MeV
GROUPE 3 : 2.25 - 2.75 MeV
GROUPE 4 : 2.75 - 3.50 MeV
TOTAL : 1.25 - 3.50 MeV

TABLEAU 3

FLUX SANS CHOC AU NIVEAU DU DETECTEUR POUR DIFFERENTS NIVEAUX 5 H. APRES ARRET DU REACTEUR

CONFIGURATION	FLUX PAR GROUPES γ cm^{-2} s^{-1}					NIVEAU
	1	2	3	4	TOTAL	
PLENUM SUPERIEUR PLEIN	$3.89\ 10^{-5}$	$4.28\ 10^{-4}$	$3.04\ 10^{-3}$	$3.88\ 10^{-3}$	$7.39\ 10^{-3}$	PLEIN
	$1.96\ 10^{-2}$	$8.66\ 10^{-2}$	$2.12.\ 10^{-1}$	$2.87\ 10^{-1}$	$6.05\ 10^{-1}$	HAUT DES TUBULURES
	$9.08\ 10^{-1}$	2.31	6.74	4.33	$1.43\ 10^{1}$	BAS DES TUBULURES
	$1.84\ 10^{1}$	$3.16\ 10^{1}$	$7.10\ 10^{1}$	$3.16\ 10^{1}$	$1.53\ 10^{1}$	SOMMET DU COEUR
LE NIVEAU DECROIT DEPUIS LE SOMMET DE LA CUVE	$1.24\ 10^{-1}$	$4.1\ 10^{-1}$	1.4	$9.72\ 10^{-1}$	2.91	SUPPORT DES TUBES GUIDES
	$2.79\ 10^{1}$	$4.21\ 10^{1}$	$8.99\ 10^{1}$	$3.93\ 10^{1}$	$1.99\ 10^{2}$	HAUT DES TUBULURES
	$1.28\ 10^{3}$	$1.12\ 10^{3}$	$1.76\ 10^{3}$	$5.34\ 10^{2}$	$4.69\ 10^{3}$	BAS DES TUBULURES
	$2.52\ 10^{4}$	$1.52\ 10^{4}$	$1.87\ 10^{4}$	$4.35\ 10^{3}$	$6.35\ 10^{4}$	SOMMET DU COEUR

TABLEAU 4

FLUX SANS CHOC AU NIVEAU DU DETECTEUR POUR DIFFERENTS NIVEAUX 24 H. APRES ARRET DU REACTEUR

CONFIGURATION	FLUX PAR GROUPES γ cm^{-2} s^{-1}					NIVEAU
	1	2	3	4	TOTAL	
PLENUM SUPERIEUR PLEIN	$2.62\ 10^{-5}$	$9.\ 10^{-5}$	$8.34\ 10^{-4}$	$2.15\ 10^{-4}$	$1.27\ 10^{-3}$	PLEIN
	$1.32\ 10^{-2}$	$1.82\ 10^{-2}$	$6.52\ 10^{-2}$	$1.59\ 10^{-2}$	$1.12\ 10^{-1}$	HAUT DES TUBULURES
	$6.12\ 10^{-1}$	$4.86\ 10^{-1}$	2.07	$2.4\ 10^{-1}$	3.38	BAS DES TUBULURES
	$1.24\ 10^{1}$	6.64	$2.18\ 10^{1}$	1.75	42.6	SOMMET DU COEUR
LE NIVEAU DECROIT DEPUIS LE SOMMET DE LA CUVE	$8.37\ 10^{-2}$	$8.62\ 10^{-2}$	$4.31\ 10^{-1}$	$5.39\ 10^{-2}$	$6.55\ 10^{-1}$	SUPPORT DES TUBES GUIDES
	18.8	8.84	27.6	2.18	57.4	HAUT DES TUBULURES
	$8.62\ 10^{2}$	$2.35\ 10^{2}$	$5.4\ 10^{2}$	29.6	$1.67\ 10^{3}$	BAS DES TUBULURES
	$1.7\ 10^{4}$	$3.2\ 10^{3}$	$5.79\ 10^{3}$	$2.41\ 10^{2}$	$2.61\ 10^{4}$	SOMMET DU COEUR

IV.4 Flux sans choc dû aux produits de corrosion

IV.4.1 Sources

Seul le Cobalt a été pris en compte, les γ émis pour les autres corps ayant un libre parcours moyen et/ou une activité faible en comparaison.

Son activité au niveau du plenum supérieur a été estimée à 2.6 $\mu Ci/cm^2$ /5/.

Il est disposé uniformément à la surface des internes supérieurs et de la cuve, dans le plenum supérieur, sous la forme d'un dépot de faible épaisseur.

L'énergie considérée pour le calcul est de 1.25 MeV.

IV.4.2 Résultats

Les calculs ont été effectués pour différents niveaux d'eau. La Figure 36 donne la variation du flux au niveau du détecteur en fonction du niveau, et le rapport entre le taux de comptage dû aux dépots situés dans la cuve et ceux situés sur le reste des internes. On remarque que le niveau doit avoir baissé de l'ordre de 70 cm pour observer un changement significatif du taux de comptage.

IV.5 Activation des structures

La plaque supérieure du coeur, qui est la structure ayant la contribution la plus importante, à une activité inférieure d'un facteur 100 à celle du combustible, 24 H après arrêt, à l'énergie du cobalt, et n'influencera pas le taux de comptage.

IV.6 Contamination eau primaire pour des ruptures de gaine

IV.6.1 Paramètres intervenant dans l'activité de l'eau primaire

En fonctionnement normal, un certain nombre de gaines peuvent présenter des microfissures. Des produits de fission passent dans le circuit primaire par recul (courtes périodes) et diffusion (longues périodes).

L'activité des P.F dans l'eau primaire dépend des paramètres suivants :

1) Puissance linéique des crayons ruptés,
2) Taille des ruptures de gaine,
3) Taux de combustion des crayons ruptés,
4) Conditions de fonctionnement du réacteur (débit d'épuration dans le RCV, mouvements d'eau).

Les valeurs qui ont été prises en compte, ci-après, correspondent à un cas extrême, mais vraisemblable.

- Taux de rupture de gaine 0.25 %.
- Contamination initiale des gaines : 0,5 g d'uranium enrichi à 3,2 % en 235U pour l'ensemble du coeur.
- Puissance de fonctionnement 100 % PN (Pn = 2785 MWTH).

1. Influence de la puissance linéique

Les Figures 42 (a, b, c) représentent la variation d'Activité dans l'eau primaire en Ci/T des gaz rares, iodes et césiums en fonction de la puissance linéique des crayons ruptés pour des ruptures de taille moyenne ($\nu g = 10^{-4}\ s^{-1}$) la puissance linéique augmente de 125 à 275 w/cm.

Les isotopes ayant une variation d'activité importante (facteur 100 pour le ^{134}Cs, $\simeq$ 10 pour le ^{133}Xe, ^{85}Kr, ^{137}Cs, ^{131}I) ont une contribution négligeable dans la bande d'énergie de 1.25 à 3.5 MeV.
Le taux de comptage sera pratiquement indépendant de la puissance linéique (à condition que l'intégrité de la gaine soit respectée).

2. Influence de la taille des ruptures de gaine

Le rapport $R = \frac{\text{Activité de l'eau en cas de rupture franche (g = 10}}{\text{Activité de l'eau en cas de microfissure (g = 10}}$

permet de mettre en évidence l'influence de la taille des ruptures de gaine sur l'activité de l'eau primaire.

La taille des ruptures influe fortement sur les courtes périodes (R = 420 pour ^{89}Kr).
Pour les gaz rares, R = f( ) est indépendante de la puissance linéique. Pour les Iodes, la taille des ruptures influe fortement sur l'activité. (R $\simeq$ 500 pour ^{131}I, ^{132}I, ^{133}I, ^{135}I), et R varie légèrement avec la puissance linéique.
Le taux de comptage dépend fortement de la taille des ruptures de gaine.

3. Influence du taux de combustion

Les Figures 43 (a, b) montrent que :

- l'activité des iodes et Xénon est indépendante du taux de combustion alors que l'activité des kryptons dans l'eau primaire diminue au début à la fin de l'irradiation.
Ces résultats s'expliquent par l'évolution du combustible, les rendements de fission des kryptons étant approximativement 3 fois plus faibles pour le plutonium que pour ^{235}U.
Le taux de comptage dû aux produits de fission en solution dans l'eau serait pratiquement indépendant du taux de combustion.

4. Influence des paramètres de fonctionnement du coeur

a) Influence du débit RCV

Le débit RCV n'a aucune influence sur l'activité des gaz rares dans l'eau primaire.

Pour les PF solides, l'activité des longues périodes diminue fortement lorsque le débit augmente de 0 à 27 m3/h (facteur 23 pour ^{140}La).

b) Influence des mouvements d'eau et des fuites primaires

L'influence n'est sensible que sur les longues périodes, et n'intervient donc pas pour le taux de comptage.

IV.6.2 Résultats

Les sources ont été considérées uniformément réparties dans l'eau du plénum supérieur. Le tableau ci-dessous donne le flux au niveau du détecteur pour 2 niveaux d'eau.

1. Le niveau arrive au sommet de la cuve,
2. Le niveau arrive au sommet des tubes guides, (décroissance de 90 cm)

ENERGIE (MEV)	3.50	2.75	2.25	1.75	1.25	TOTAL
FLUX NIVEAU 1 (γ cm^{-2}s^{-1})	3.96 10^{-1}	2.06	1.094^{-1}	2.62 10^{-1}		3.81
FLUX NIVEAU 2 (γ cm^{-2}s^{-1}	3.63 $^{-2}$	1.89 $^{-1}$	1.10^{-1}	2.4 10^{-2}		0.35

V. AZOTE 16

Pendant le fonctionnement du réacteur, l'activation de l'oxygène de l'eau fournit des isotopes à courte période, principalement O^{16} (n,p) N^{16}. L'Azote 16 émet des gamma à 6.1 MeV avec un rendement de 0.69 et à 7.1 MeV avec un rendement de 0.05.

Après arrêt du réacteur, le flux γ dû N^{16} va décroitre avec une période de 7.1 s.

Il convient de connaître la valeur de ce flux au niveau du détecteur, à puissance nominale, afin d'estimer le temps nécessaire pour que sa contribution devienne négligeable par rapport au flux dû aux produits de fission du coeur (confinés dans le combustible).

V.1 Région B

L'activité de N^{16} dans cette région a été estimée, à puissance nominale à 200 Ci/m³. Le flux de gamma au niveau du détecteur est de 22 $\gamma\ cm^{-2}\ s^{-1}$.

V.2 Région A (plenum supérieur)

Dans le plénum supérieur, l'activité a fortement décru du fait du temps de transit dans le circuit primaire et du débit de recirculation faible dans cette région.

Le flux gamma est de 13.6 $\gamma\ cm^{-2}\ s^{-1}$ pour une source de 0.1 Ci/m3.

100 s après arrêt du réacteur, le flux dû aux PF du coeur est $1.5\ 10^{-1}\ \gamma\ cm^{-2}\ s^{-1}$.

Le flux dû à l'azote 16, au même moment, serait de $3.10^{-3}\ \gamma\ cm^{-2}\ s^{-1}$ et peut être négligé.

VI CALCUL DU FLUX PROVENANT DES STRUCTURES SITUEES AU DESSUS DE LA CUVE

Comme on l'a vu en III, la partie des tubes guides située au dessus de la cuve, émet des γ à l'énergie du Cobalt.

Afin d'éviter d'obtenir une contribution supérieure à celle de la source utile, il s'avère nécessaire de protéger le détecteur. La disposition des barres limite l'épaisseur de la protection (Figure 40).

Le Tableau suivant donne le flux au niveau du détecteur, en fonction du matériau considéré et de son épaisseur.

Le plomb laissant passer un flux trop important, il serait nécessaire d'utiliser du Dénal (alliage ayant un coefficient d'atténuation proche de celui du tungstène) ou de l'uranium appauvri ; la radioactivité propre de l'uranium n'infuençant pas le taux de comptage.

FLUX GAMMA AU NIVEAU DU DETECTEUR DU AUX STRUCTURES SITUEES AU DESSUS DE LA CUVE EN FONCTION DU MATERIAU DE PROTECTION CONSIDERE ET DE SON EPAISSEUR

EPAISSEUR DE PROTECTION (cm)	FLUX AU NIVEAU DU DETECTEUR (γ cm^{-2}s^{-1})		
	Plomb d = 11.4	Denal d = 17.4	Uranium d = 19.1
5	$1.2\ 10^{3}$	$1.9\ 10^{2}$	8.10^{1}
10	$3.8\ 10^{1}$	1.1	2.10^{-1}
15	1.3	6.10^{-3}	5.10^{-4}
20	5.10^{-2}	3.75^{-5}	1.4^{-6}

VII ANALYSE DES RESULTATS

VII.1 Contribution des différentes sources

Pour la collimation du détecteur considérée, nous avons montré que la contribution de l'azote 16 (V) et de l'activation des structures (IV.5 et VI) peuvent être négligées, quel que soit l'état du fluide.

L'importance relative des autres contributions (P.F du combustible, P.F des ruptures de gaines, dépots de corrosion) dépend :

- De la répartition du fluide,
- Du temps après l'arrêt du réacteur.

L'influence de ces deux paramètres est montrée sur les Figures 37 et 38, avec les hypothèses suivantes :

- Les dépots de corrosion n'évoluent pas de façon sensible au cours du temps après l'arrêt du réacteur (La demie vie du Co 60 est de 5,2 ans).

- En ce qui concerne les ruptures de gaines, nous avons pris une hypothèse majorante en ne prenant pas en compte leur décroissance au cours du temps.

. La Figure 37 montre les flux (somme des flux par groupe) au niveau du détecteur, dûs aux sources suivantes :

- Les PF du coeur (100 s, 5 H, 24 H après arrêt),
- Les P.F en solution (0.25 % de ruptures de gaines produites avant l'arrêt du réacteur),
- Les dépôts de corrosion.

Le dome restant plein d'eau et le niveau décroissant dans la région comprise entre le coeur et la plaque support des tubes guides (Région B).

. La Figure 38 montre les flux dûs aux mêmes contributions que précédemment, le niveau décroissant depuis le sommet de la cuve (Le dome se vide).

VII.2 Discussion

L'examen des Figures 37 et 38 nous permet d'observer les points suivants :

VII.2.1 Le niveau décroit depuis le sommet de la cuve (Figure 37)

. Pour un temps donné après arrêt du réacteur, la décroissance du niveau dans le dome entraîne :

- La diminution de trajet parcouru par les gamma dans l'eau, provoquant une augmentation du flux dû aux PF du coeur et aux dépôts de corrosion.

- La diminution du volume de la source correspondant aux PF en solution dans l'eau, entraînant une décroissance du flux dû à ces sources.

. Pour un niveau donné, il existe un temps après arrêt à partir duquel les sources "parasites" (principalement PF en solution) ont une contribution au flux supérieure aux PF du coeur.

Dans le cas le plus défavorable parmi ceux considérés (24 H après arrêt du réacteur), les flux dû aux PF en solution et aux dépots de corrosion deviennent négligeables par rapport aux PF du coeur lorsque le niveau à décru jusqu'à la plaque support des tubes guides. Le dénoyage des tubulures (et à fortiori celui du coeur) serait donc détecté, même 24 H après arrêt du réacteur.

Il est à noter que ce cas est le plus probable.

VII.2.2 Le dome reste plein (Figure 38)

Le niveau décroit dans la région comprise entre le coeur et la plaque support des tubes guides.

Pour un niveau donné

- Le temps au bout duquel les sources "parasites" ont une contribution au flux supérieur à celle des PF du coeur dépend du mode de fonctionnement du détecteur.

  . Mode courant (pas de discrimination en énergie)
  Le détecteur compte les γ quelle que soit leur énergie. Dans ce cas, le dénoyage des tubulures serait détecté jusqu'à 1 H après arrêt du réacteur (Figure 39).

  . Mode impulsionnel
  Une mesure dans la gamme d'énergie 2.75 - 3.5 MeV permettrait de repousser la limite précédente jusqu'à 5 H après arrêt du réacteur.

- Dans les 2 modes de fonctionnement du détecteur, le dénoyage du coeur est détecté.

VII.2.3 Détermination de la région où se forme une zone de vapeur

Pour pouvoir déterminer précisément le niveau, il est nécessaire de connaître si le dome reste plein ou non.

L'observation de la variation du flux dû aux dépôts de corrosion en fonction du niveau (Figure 36) montre qu'une mesure à l'énergie des dépôts de corrosion (au voisinage de 1.25 MeV) permet de déterminer où se situe le niveau à condition qu'à cette énergie les autres contributions au flux soient négligeables.

Dans la bande en énergie de 1.25 à 1.75 MeV, la contribution des PF du coeur est supérieure à celle due aux dépôts de corrosion.

La détermination de la région où se forme une bulle de vapeur nécessiterait d'effectuer une discrimination fine en énergie au voisinage d'une raie de cobalt 60 ; cette mesure étant effectuée par un second détecteur, incliné et collimatée de façon à réduire la contribution des gamma provenant du coeur.

En l'absence de ce détecteur, la méthode donne une estimation de la masse d'eau contenue dans la cuve.

VII.3 Estimation de la précision de la méthode

VII.3.1 Limitations du modèle

Le modèle d'atténuation en ligne droite ne prend pas en compte, dans une bande en énergie, les gammas émis à une énergie supérieure et diffusés dans cette bande.

Cette influence est moins sensible dans la bande en énergie 2.75 à 3.5 MeV, le flux à une énergie supérieure à 3.5 MeV étant négligeable. Une discrimination dans cette bande en énergie devrait être une assez bonne estimation d'un cas réel.

VII.3.2 Estimation de la dimension minimale détectable d'une zone de vapeur

La présence de vapeur sera détectée lorsque la variation du signal, provoquée par la variation de masse volumique, sera supérieure aux fluctuations statistiques du signal. L'écart type statistique étant en $\frac{1}{\sqrt{2\tau\vartheta}}$, τ étant le taux de comptage moyen et ϑ la constante de temps.

La Figure 41 montre l'incertitude commise pour différents temps après arrêt, en fonction du niveau, avec les hypothèses suivantes :

- La variation du signal doit être supérieure à 3 écarts types statistiques.

- Détecteur N AI de 10 cm de diamètre et de rendement moyen 0.7.

- Constante de temps de 10 s.

On remarque que lorsque le niveau arrive au voisinage des tubulures, une variation du niveau 1 cm est détectée, y compris 24 H après arrêt.

VIII CONCLUSION DE LA 4EME PARTIE

L'étude précédente a permis de dégager les points suivants :

. La détermination de la région où se forme une zone de vapeur nécessite d'utiliser un second détecteur situé au dessus de la cuve et fonctionnant en mode impulsionnel. En l'absence de ce détecteur la méthode permet d'estimer la masse d'eau présente dans la cuve.

. En l'absence de ruptures de gaines, le dénoyage du coeur et des tubulures est détecté y compris 24 Heures après l'arrêt du réacteur.
La variation de niveau détectée est de l'ordre du centimètre au voisinage des tubulures et d'une dizaine de centimètres au dessus de cette région.

. En présence de ruptures de gaines produites avant l'arrêt du réacteur, la prise en compte du nombre maximal de ruptures admissibles en fonctionnement impose des limitations si le dome reste plein.

Dans ce cas, pour un détecteur fonctionnant en mode impulsionnel, le dénoyage des tubulures n'est plus détecté une heure après l'arrêt du réacteur. Cette limite est repoussée à cinq heures pour un détecteur fonctionnant en mode courant.

Si le dome se vide, 24 Heures après arrêt le dénoyage des tubulures est toujours détecté.

Dans les 2 cas le dénoyage du coeur est observé.

. La méthode de mesure des gammas émis par le coeur permettrait de détecter un éventuel assèchement du coeur. Si le coeur est découvert et que des ruptures de gaines se produisent, le renoyage du coeur ne serait pas détecté. Cette information pourrait être obtenue par une mesure du taux de vide dans une branche chaude par transmission de gamma.

REFERENCES SUR LA QUATRIEME PARTIE

/1/ P. KEHLER

"Water level measurement in PWR Cores by pulsed-neutron technique"
NRC Reactor Safety Instrumentation
Review group Meeting
Silver Spring, Maryland 24-26 July 1979

/2/ S. UNTERMEYER, E. BECKJORD, D. FISCHER
M.A. HEAD, L.K. HOLLAND, L. KORNBLITH, L. WELSH

"Exploitation d'un réacteur à eau bouillante légère à hautes performances".
Utilisation pacifique de l'énergie nucléaire
2ème Conférence de Genève - p. 1923 pp 797 à 811 1958

/3/ J.A. THIE, J. BEIDELMAN, B. HOGLUND

"Void measurement in a boiling reactor".
Nuclear Science and Engineering Vol. 11 1961

/4/ S. UNTERMEYER

"Neutron Telescope monitors local power density"
Nucleonics February 1962

/5/ C. LEUTHROT

Communications personnelles

/6/ C. LEUTHROT, J.J. SEVEON

"Calcul de l'activité des produits de fission dans l'eau primaire à l'aide du code PROFIP-3 pour un réacteur PWR de 900 MWe.
Note Technique SERS Novembre 1979

/7/ C. DEVILLERS

"L'accident de Three Mile Island"
Communication au 11ème Congrès National de l'Association pour les Techniques et Sciences de Radioprotection. Nantes 18-21 Septembre 197
Rapport SERS Novembre 1979

/8/ C. DEVILLERS, J.P. PAYEN, D. MANESSE

"Activité β,α, neutronique, spectre d'émission γ et puissance résiduelle d'un combustible PWR irradié".
Rapport SERMA Juin 1977

/9/ Meeting on Reactor Vessel
Liquid level measurement
Gaithersburg, Maryland 30 Octobre 198

5 E M E P A R T I E

MESURE DU TAUX DE VIDE DANS UNE BRANCHE CHAUDE PAR TRANSMISSION DE GAMMA

I INTRODUCTION

Au cours des accidents de perte du fluide réfrigérant primaire par petites brèches, et plus généralement des séquences accidentelles, le circuit primaire fonctionnera selon différents "états" ou configurations physiques. (convection forcée simple et double phase, thermosyphon simple et double phase, caloduc avec coeur plus ou moins découvert).

Ces différents état de fonctionnement devraient pouvoir être identifiés et caractérisés au moyen d'une instrumentation appropriée.

Les indications de cette instrumentation doivent permettre aux opérateurs de suivre les évolutions de ces états de façon à leur permettre d'établir des diagnostics, et de prendre les mesures nécessaires pour un retour à l'état sûr.

Parmi les paramètres physiques permettant un tel diagnostic, la connaissance de la fraction volumique de vapeur, ou taux de vide, dans les branches chaudes apporterait de précieuses indications.

Les principales spécifications d'une instrumentation de mesure du taux de vide branche chaude sont :

- Estimation du taux de vide moyen, pour α variant entre 0 et 1, avec une bonne précision en particulier pour les faibles valeurs de α.

- Indication sur la stratification.

- Insensibilité aux autres paramètres de fonctionnement du réacteur (activité et chimie de l'eau primaire, pression et température enceinte ...).

- Qualification aux conditions PWR (normales et accidentelles).

Diverses méthodes sont, à priori, envisageables, et l'on peut distinguer.

- Les méthodes intrusives, locales ou globales (méthodes électriques, optiques, thermiques, ΔP tuyaux).

- Les méthodes non intrusives, essentiellement :

  . Ultrasons,
  . Transmission γ,
  . Transmission neutrons.

Les méthodes utilisant la transmission de particules sont intéressantes car elles ne nécessitent aucune intervention sur les composants du circuit primaire et permettent de mesurer le taux de vide moyen α précisemment et continuement entre 0 en 1, en donnant des informations sur la stratification.

La méthode utilisant des neutrons de 14 MeV pourraît-être envisagée (elle est indépendante de l'activité gamma et ne pose pas de problèmes de radioprotection), mais semble lourde à mettre en oeuvre. Seule la solution de générateurs à tubes scellés performants serait utilisable dans le cadre de cette technique.

C'est pour ces raisons que nous envisageons, pour la mesure du taux de vide, un dispositif à rayonnement gamma du Cobalt 60, la détection se faisant à l'aide de chambres à ionisation.

Ce système est relativement simple et facile à mettre en oeuvre. Nous verrons plus loin qu'il nécessite des sources inférieures à 1000 curies ppour conserver pendant 5 à 10 ans une bonne précision de mesure.

II. PRINCIPE DE LA METHODE PAR TRANSMISSION GAMMA

La méthode de mesure de la densité dans une tuyauterie par atténuation du rayonnement gamme est décrite dans la 1ère partie. Nous en rappelons le principe général.

On place (Figures 44 et 45) une source collimatée, de rayonement gamma, d'un côté de la tuyauterie et l'on détecte avec un ou plusieurs détecteurs situés de l'autre côté, le rayonnement ayant traversé la tuyauterie.

II.1 Expression du signal du détecteur

Nous rappelons les principales formules, avec la notation donnée dans la première partie.

En appliquant un modèle d'atténuation en ligne droite, justifié dans le cas qui nous intéresse (Cf. 2ème partie, IV.2.3), le taux de comptage dû à la source s'écrit :

$$\tau(E) = \tau_0 \times \exp\left(-2 \int_0^{e_p} \sigma_p(E)\, \rho_p(y)\, dy\right) \times \exp\left(-\int_0^{L} \sigma_{(E)}\, \rho(y)\, dy\right) \quad (1)$$

En effectuant une mesure avec le fluide à une densité ρ_{N1} déterminée, et en effectuant une deuxième mesure, à une masse volumique ρ_{N2} également connue, la masse volumique moyenne, à une température T inconnue est donnée par la formule :

$$\rho = \frac{\text{Log}\left(\frac{\tau}{\tau N1}\right)}{\text{Log}\left(\frac{\tau N2}{\tau N1}\right)} (\rho_{N2} - \rho_{N1}) + \rho_{N1} \quad (2)$$

Sachant que, d'autre part, on a

$$\bar{\rho} = (\rho_v \cdot \alpha) + \rho_L (1 - \alpha) \quad (3)$$

Le taux de vide est donné par :

$$\alpha = \frac{\bar{\rho} - \rho_L}{\rho_v - \rho_L} \quad (4)$$

Remarque : Il est clair que la méthode décrite permet de mesurer la densité moyenne du fluide dans une section (ou une partie de section) de la tuyauterie. Pour déterminer le taux de vide moyen correspondant, il faut connaître ρ_L et ρ_v, et donc utiliser des mesures complémentaires (essentiellement la pression).

II.2 Application aux conditions de la mesure de taux de vide branche chaude

II.2.1 Taux de comptage

Nous avons considéré les données suivantes :

Nature de la source	C_o^{60}
Activité de la source	500 Curies
Détecteur	Chambre LND 50312
$Ø_{int}$ branche chaude	73,6 cm
Epaisseur de la paroi	7 cm
Distance source-détecteur	200 cm

L'application de la formule (1) nous conduit aux relations représentées sur la figure 46 pour les 2 cas suivants :

1) T_{sat} (118 bars) = 323,4°C
   ρ_L = 0,6583
   ρ_v = 0,0684

2) T_{sat} (65 bars) = 280,8°C
   ρ_L = 0,7491
   ρ_v = 0,0336

TAUX DE VIDE	TAUX DE COMPTAGE (c/s) Cas 1	Cas 2
0.	10091	6615
0.25	20000	15160
0.50	39630	34750
0.75	78530	79640
0.85	103240	110970
0.90	118370	130990
1.	155620	182530

II.2.2 Sensibilité de la méthode en l'absence de sources parasites

Partant des équations (1) et (3) nous obtenons :

$$\frac{1}{\tau}\frac{d\tau}{d\alpha} = \sigma.\ L.\ (\rho_L - \rho_V)$$

Si nous considérons une constante d'intégration C, nous aurons :

$$\Delta\alpha = \frac{1}{\sigma.\ L.\ (\rho_L - \rho_V).} \times \frac{1}{\sqrt{2\ C\ \tau}}$$

$\sigma = 0{,}063\ cm^2/g$

$L = 73{,}6\ cm$

1er cas : $T_{sat} = 323{,}4°C$ $P = 118$ bars
$\rho_L = 0{,}6583$ $\rho_V = 0{,}0684$ $\Delta\alpha = \frac{1}{2{,}7362}\sqrt{2\ C\ \tau}$

2ème cas : $T_{sat} = 280{,}8°C$ $P = 65$ bars
$\rho_L = 0{,}7491$ $\rho_V = 0{,}0336$ $\Delta\alpha = \frac{1}{3{,}3116}\sqrt{2\ C\ \tau}$

Pour une constante d'intégration de 10 secondes et en considant une probabilité à 95 % (2 écarts types) on est conduit aux valeurs données sur la figure 47.

TAUX DE VIDE	Sensibilité $\Delta\alpha$	
	Cas a	Cas b
0.	$1.63\ 10^{-3}$	$1.66\ 10^{-3}$
0.25	$1.16\ 10^{-3}$	$1.10\ 10^{-3}$
0.50	$8.21\ 10^{-4}$	$7.25\ 10^{-4}$
0.75	$5.83\ 10^{-4}$	$7.79\ 10^{-4}$
0.85	$5.09\ 10^{-4}$	$4.06\ 10^{-4}$
0.90	$4.75\ 10^{-4}$	$3.74\ 10^{-4}$
1.	$4.14\ 10^{-4}$	$3.17\ 10^{-4}$

Ces valeurs sont calculées dans le cas idéal où le terme de sources parasites est négligeable devant l'activité de la source.

II.2.3 Sources parasites

Divers émetteurs peuvent se trouver dans le circuit primaire.

Ce sont :

- l'azote 16
- Les produits de fission provenant de ruptures de gaines
- Les produits de corrosion en solution.
- Les dépôts de corrosion sur la surface interne de la tuyauterie.

II.2.4 Evaluation de l'activité des différentes sources

1) Azote 16

L'activité à puissance nominale au point de mesure a été considérée à 200 Ci/m^3 /2/.

2) Produits de fission

Nous avons considéré 3 cas.

a) - 0,25 % de ruptures de gaines /3/

Taux de fuite moyen 10^{-4} s^{-1}

Cette situation correspond à une limite de pollution du circuit primaire en fonctionnement normal.

b) - 100 % de ruptures de gaines /4/

Les produits de fission contenus dans le jeu combustible gaine sont relachés dans le fluide primaire, mais l'intégrité du combustible est préservée.

L'activité relachée dans l'eau est : 43410 Ci/T.

c) - 50 % de ruptures de gaines (Hypothèse post TMI)

Relâchement hors du combustible de 50 % de l'inventaire du coeur supposé uniformément irradié à 33000 MWj/t.

L'activité totale relachée dans l'eau est de 1.696 10^5 Ci/m^3 (50 % césiums + iodes, 1 heure après arrêt).

Ce terme source correspond au terme source "niveau 1" de la règle fondamentale de sécurité.

Si l'on compare avec l'accident de TMI, l'activité de l'eau primaire en fonction du temps après arrêt a été estimée à :/5/

Temps après début de l'accident	Ci/m^3
0	0.4
2 h	4
2 h 40	140
4 h 50	1700*
36 h 15	800 000

Soit une activité maximum 4,7 fois plus importante que celle prise en compte dans le cas c.

* L'activité résiduelle de l'eau à ce moment est très certainement supérieure à la valeur mesurée, l'échantillon ayant été prélevé sans purger convenablement la ligne d'échantillonnage.

Il est à noter que l'augmentation de l'activité est due principalement aux émetteurs de basse énergie (iodes) qui sont fortement atténués par les parois.

3) Produits de corrosion en solution /4/

La concentration en produits de corrosion dépend de l'historique de fonctionnement du réacteur.

Nous nous sommes placés dans un cas de fonctionnement (après 10 cycles) pour lequel l'évolution de cette concentration a pratiquement atteint sa valeur d'équilibre (saturation).

Les concentrations concernées étant faibles devant les valeurs suivantes nous ne les avons pas retenues. (Elles sont données dans l'annexe 1).

4) Emetteurs gamma déposés sur les tuyauteries /4/

Pour 10 cycles de fonctionnement, les calculs d'évolution prévoient les concentrations suivantes ($\mu Ci/cm^2$) déposées en branche chaude.

CORPS DEPOSE	ACTIVITE	ENERGIE (MeV)	RENDEMENT (%)
59 Fe	0.99	1.29	44
54 Mn	2.4	0.83	100
58 Co	8.4	0.81	99
60 Co	13.2	1.17	100
		1.33	100
51 Cr	2.9	0.32	10

II.2.5 Calcul de l'influence des diverses sources parasites au niveau du détecteur

Ce calcul a été effectué à l'aide du code MERCURE IV.

Les produits de fission en solution ont été rassemblés en 7 groupes, de 420 KeV à 3 MeV, selon le découpage en énergie utilisé par MERCURE IV.

Ces sources ont été réparties uniformément dans l'eau circulant dans la tuyauterie.

En ce qui concerne les produits de corrosion déposés, le modèle les prend en compte sous forme d'une source volumique répartie dans une couronne de faible épaisseur en périphérie de la tuyauterie. Leur énergie moyenne a été prise à 1 MeV pour une activité totale de 2.8 10^6 $\gamma/cm^3/s$.

Le tableau suivant présente pour la géométrie considérée, les flux γ au point de mesure correspondant au différentes sources parasites.

SOURCES		PRODUITS DE FISSION							N 16	dépôt de corrosion
Energie Moyenne (MeV)		0.424	0.628	1.	1.5	2.	2.5	3.125	6	1.
Activité ($\gamma cm^{-3} s^{-1}$)	Cas a	$8\ 10^4$	$2.5\ 10^4$	$1.2\ 10^4$	$1.8\ 10^4$	$1.1\ 10^4$	$1.7\ 10^4$	$4.1\ 10^2$		
	Cas b	$1.12\ 10^9$	$1.97\ 10^8$	$1.38\ 10^8$	$1.81\ 10^8$	$6.13\ 10^7$	$2.78\ 10^7$	$3.1\ 10^6$	$4.5\ 10^6$	$2.8\ 10^5$
	Cas c	$9.82\ 10^8$	$5.04\ 10^9$	$2.87\ 10^9$	$2.1\ 10^9$	$1.5\ 10^8$	$3.65\ 10^7$	-		
Flux ($\gamma cm^{-2} s^{-1}$)	Cas a	35.4	41.9	$1.1\ 10^2$	$6.7\ 10^2$	$7.3\ 10^2$	$2.3\ 10^3$	$1.5\ 10^2$		
	Cas b	$4.96\ 10^5$	$3.3\ 10^5$	$1.27\ 10^6$	$6.72\ 10^6$	$4.07\ 10^6$	$3.76\ 10^6$	$1.14\ 10^6$	$1.3\ 10^6$	$4.10\ 10^3$
	Cas c	$4.35\ 10^5$	$8.44\ 10^6$	$2.64\ 10^7$	$7.8\ 10^7$	$9.96\ 10^6$	$4.94\ 10^6$	-		
FLUX SOURCE COBALT 500 Ci : $10^4/cm^2 \times s$										

Nous constatons que pour un fonctionnement limite du réacteur en régime normal (0,25 % de ruptures de gaines), avec les produits de corrosion à leur valeur maximale, nous obtenons un signal parasite du même ordre de grandeur que le signal dû à la source.

Pour que le niveau N 16 soit égal à celui dû à la source (10^4) il faut une atténuation de 130, soit 7 périodes de décroissance (environ 50 secondes).

Dans les cas b et c le signal parasite est respectivement 2000 fois et 12000 fois supérieur au signal dû à la source (dans le cas le plus défavorable où la tuyauterie est remplie de liquide).

L'utilisation d'une source pulsée (disque tournant devant le faisceau) permettrait de réduire l'influence des sources parasites, mais le cas c serait limite. Il est donc nécessaire de diminuer cette contribution afin d'avoir une meilleure précision.

Il est clair que la collimation a une influence prépondérante.

Le tableau suivant donne le flux, pour les cas b et c, pour différentes collimations de 20 cm de haut au lieu de 11 cm pour les calculs précédents.

La source est rapprochée de 9 cm de la paroi de façon a conserver la distance source-détecteur, et donc le flux dû à la source de 500 Ci de cobalt.

Collimation	Fenêtre de collimation (cm)	Collimateur (cm)	Matériau
1	10 x 3	24 x 17	Pb
2	10 x 3	24 x 17	U
3	1 x 1	15 x 15	Pb

Les collimations 1 et 2 sont la même géométrie, le plomb étant remplacé par de l'Uranium appauvri.

ENERGIE MOYENNE (MeV)	FLUX (γ cm^{-2} s^{-1})		
	Collimation 1	Collimation 2	Collimation 3
3.125	8. 8 10^4	8.0 10^4	4.20 10^3
2.5	5.92 10^5 / 7.76 10^5	5.44 10^5 / 7.15 10^5	2.52 10^4 / 3.31 10^4
2.	9.50 10^5 / 2.33 10^6	8.56 10^5 / 2.09 10^5	3.33 10^4 / 8.15 10^4
1.5	1.60 10^6 / 1.86 10^7	1.48 10^6 / 1.72 10^7	2.83 10^4 / 3.28 10^5
1.	5.28 10^5 / 1.10 10^7	4.90 10^5 / 1.02 10^7	5.77 10^3 / 1.20 10^5
0.628	2.42 10^5 / 6.20 10^6	2.37 10^5 / 6.05 10^6	1.47 10^3 / 3.75 10^4
0.424	4.74 10^5 / 4.16 10^5	4.60 10^5 / 4.04 10^5	2.08 10^3 / 1.83 10^3
Ø Total	4.48 10^6 / 3.93 10^7	4.15 10^6 / 4.78 10^7	1.00 10^5 / 6.02 10^5

Cas b / Cas c

On remarque que remplacer le plomb de la collimation 1 par de l'uranium ne provoque qu'une faible diminution de flux. Ce résultat montre que l'épaisseur de la collimation est suffisante.

Si l'on regarde la collimation 3, où la surface utile du détecteur est de 1 cm^2, le rapport du taux de comptage dû a la source au taux de comptage parasite vaut 1/10 pour le cas b et 1/60 pour le cas c (nous supposons que le rendement du détecteur varie peu avec l'énergie). Soit, pour cas c, une amélioration du rapport signal utile/signal parasite d'un facteur 65 par rapport à la collimation 1.

Ce résultat montre que si l'on plaçait dans la fenêtre de collimation 1, un collimateur quadrillé "idéal" consistant en un ensemble de fenêtres de collimation de 1 x 1 cm séparées par des plaques très minces, infiniment absorbantes, le rapport signal utile/signal parasite serait celui correspondant à la collimation 3, le taux de comptage dû à la source étant pratiquement celui correspondant à la collimation 1 (la surface totale est conservée).

Ce collimateur "idéal" améliore le rapport signal sur bruit, pour la collimation 1, d'un facteur 65 (un collimateur réel doit faire gagner un facteur moindre, de l'ordre de 20 à 30).

II.3 Modulation de source

Pour pouvoir effectuer une mesure précise de la densité moyenne, en présence de sources parasites importantes (produits de fission dans l'eau primaire après dégradation du combustible), on peut moduler le signal de la source et appliquer des méthodes de traitement du signal sur le courant du détecteur.

Nous allons estimer le gain apporté par cette technique, en appliquant la méthode de mesure de la densité spectrale de puissance (DSP) du signal et de soustraction du bruit parasite (dans la pratique on pourra utiliser d'autres méthodes, intercorrélation avec le signal de modulation par exemple).

Pour simplifier la présentation nous considérerons une modulation sinusoïdale du signal source, bien qu'en pratique, nous serons conduits à une modulation par créneaux.

Soient :

a_1 : nombre moyen de coups par seconde dû à la source lorsque le collimateur variable est ouvert

a_2 : fluctuation statistique du signal source

b_1 : nombre de coups par seconde dû aux sources parasites

b_2 : fluctuation statistique des sources parasites

$\bar{q}$: charge électrique moyenne par gamma détecté

$\Delta\nu$: résolution fréquentielle d'analyse

B : largeur de bande

On montre (annexe 2) que le temps nécessaire pour mesurer a_1 avec une précision donnée $\frac{\Delta a}{a}$ est :

$$\theta = 3.2 \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta\nu}} + \frac{1}{\sqrt{B}} \frac{a1 + b1}{a1^2} \frac{1}{\frac{\Delta a1}{a1}} \right)^{2/3}$$

Cette valeur du temps de traitement nécessaire pour avoir une précision donnée pour un taux de comptage parasite b_1, est présentée sur la figure 48.

Les courbes sont tracées pour $\frac{\Delta a1}{a1} = 10^{-2}, 2 \times 10^{-2}, 5 \times 10^{-2}, 10^{-1}$, $\Delta\nu = 10^{-2}$ Hz, B = 5 Hz, pour la collimation 1, avec et sans le système collimateur quadrillé d'efficacité prise égale à 20, avec une source de 500 Ci de Cobalt 60.

Les valeurs de b_1 correspondant aux diverses sources volumiques de PF sont indiquées pour les cas suivants :

- 0,25 % de ruptures de gaines.
  A1 : sans collimateur quadrillé.

- 100 % de ruptures de gaines, PF dans le jeu combustible gaine passant dans l'eau : B_1 sans collimateur quadrillé
  B_2 avec collimateur quadrillé.

- Activité d'eau primaire lors de l'accident TMI (50 % (Cs + I) du combustible) : C_1 sans collimateur quadrillé
  C_2 avec collimateur quadrillé.

Nous pouvons donc voir qu'avec une source de 500 Ci, sans collimateur quadrillé, le temps de traitement nécessaire dans le cas le plus défavorable est de 120 s pour une précision de 1 % et de 41 s pour une précision de 5 % sur le taux de comptage dû au signal de la source Cobalt.

Avec un collimateur quadrillé d'efficacité 20, ces valeurs deviennent 16,5 s (1 %) et 5,6 s (5 %), soit, pour un temps de traitement 16,5 s une erreur absolue sur le taux de vide de 4.10^{-3}.

Les calculs ont été effectués dans la configuration tuyau entièrement en liquide ($\alpha = 0$, τ source = 1.10^4).

La présence de vapeur dans le liquide entraîne, d'une part la diminution de b_1 (le volume des sources parasites diminue), et d'autre part l'augmentation de a_1 (l'atténuation par la vapeur est plus faible que celle due au liquide).

Pour un temps de mesure donné, la précision augmentera avec le taux de vide.

III. DISPOSITIF ENVISAGE

III.1 Description

Le dispositif serait, pour une branche chaude, constitué de deux ensembles chateau + source + détecteurs diamétralement opposés.

Chaque chateau contenant une source serait équipé d'un bouchon collimateur tournant pour la modulation de source et d'un deuxième collimateur permettant d'envoyer plusieurs faisceaux et permettant d'avoir des indications sur la stratification.

Les figures 44 et 45 représentent le principe de ce dispositif.

Sur la figure 44 nous avons un système simple : 1 source et un détecteur par branche chaude.

Sur la figure 45 nous avons un système plus complet : 2 sources - plusieurs détecteurs par branche chaude.

Ce sont des schémas simplifiés.

Compte tenu de la période radioactive du Cobalt 60, il sera probablement nécessaire de prévoir des changements de source tous les 5 ou 10 ans, (avec par exemple 1000 Curies au temps zéro, il ne reste que 250 Curies au bout de 10 ans). La mise en place d'un tel système nécessitera des travaux particuliers d'aménagement mais sans toucher à l'intégrité des circuits.

Le dispositif fournirait une mesure de densité moyenne et d'indication de stratification continuement au cours du fonctionnement de la centrale (avec une période d'édition de Θ).

III.2 Points particuliers

Dynamique des détecteurs gammas

Les chambres d'ionisation à gamma qui seront utilisées devront délivrer un signal représentatif avec de bonnes conditions de fidélité et de linéarité pour des débits de dose variant entre 25 mR/h et 125 R/H. Ces conditions sont tout à fait dans les performances des chambres d'ionisation à gamma du commerce.

Conditions de température

Les conditions de températures correspondent à une température maximale de 150°C pendant 1 heure /6/.

Le moteur du système de collimation doit pouvoir supporter ces conditions.

Du point de vue des chambres d'ionisations, ces conditions peuvent être supportées par des détecteurs adaptés (nature des isolants, etc...).

Incertitudes géométriques

Les influences sur le signal du changement d'épaisseur de métal dus aux variations de températures sont faibles. (inférieur à 0,7 %).

Par contre, les déformations de la tuyauterie et ses déplacements radiaux pourraient changer la position de la section mesurée dans la tuyauterie et introduire des incertitudes sur la mesure. Après avoir chiffré cette influence des précautions particulières peuvent être prises pour éviter cette difficulté. (détecteurs et leur blindage solidaires de la tuyauterie).

Ambiance de rayonnement dans l'environnement du système

Avec un blindage latéral suffisant (de l'ordre de 15 cm de Pb) la contribution de l'ambiance doit être négligeable. Il est important de concevoir et réaliser le blindage collimation des détecteurs pour éviter que des sources parasites puissent venir, en cas de ruptures de gaines, se placer très près du détecteur.

IV. CONCLUSION DE LA CINQUIEME PARTIE

La méthode par transmission gamma doit permettre la mesure de taux de vide avec une bonne précison, même dans le cas de renoyage du coeur et des hypothèses conservatives sur les ruptures de gaines et l'activité de l'eau, en appliquant les méthodes de traitement du signal.

La fiabilité et la disponibilité d'un tel dispositif ne pose pas de problème particulier ainsi que sa tenue aux conditions accidentelles.

REFERENCE SUR LA CINQUIEME PARTIE

/1/ - DUBAIL, FAVENNEC
Communications personnelles.

/2/ - B. PAPIN, J. ROMEYER-DHERBEY
Mesures de débit et de puissance par Azote 16 Etudes sur les dispositifs de collimation.
Note SEN/LPRE - Juillet 1980.

/3/ - C. LEUTHROT, J.J. SEVEON
Calcul de l'activité des produits de fission dans l'eau primaire à l'aide du code Profip-3 pour un réacteur de 900 MWe".
Note technique SERS - Novembre 1979.

/4/ - C. LEUTHROT, A. LALET
Communications personnelles.

/5/ - C. DEVILLERS
"L'accident de Three Mile Island"
Rapport SERS - Novembre 1979.

/6/ - J.F. PETETROT
Communications personnelles.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A l'issue de cette étude, nous pensons avoir montré l'intérêt des méthodes radioactives comme moyen d'investigation.

Il apparaît que l'application de ces méthodes à des centrales peut être envisagée.

. L'utilisation de la méthode gamma, pour déterminer le débit et la température dans la ligne d'expansion du pressuriseur, est en cours sur la centrale de DAMPIERRE.

. Des développements ultérieurs de la méthode de mesure du taux de vide dans une branche chaude, par transmission de gamma, sont en cours d'investigation ; en particulier des études expérimentales portant sur les points suivants :

- Influence du taux de vide, suivant la configuration de l'écoulement,
- Collimation quadrillée,
- Modulation de source et simulation des sources parasites.

. La méthode par transmission de gamma émis par une source intense de Co^{60} semble adaptée à une mesure continue du niveau et de la masse d'eau dans le pressuriseur.

Une maquette de pressuriseur a été définie. Elle permettra d'étudier les points suivants :

- Optimisation du nombre de détecteurs,
- Simulation de configurationss diphasiques particulières et liaison entre le taux de comptage et la masse d'eau dans le pressuriseur,
- Traitement de l'information.

. Nous a vons montré la possibilité d'estimer la masse d'eau dans la cuve, après arrêt du réacteur, par comptage des gamma émis par le combustible. Cette étude pourrait être prolongée dans les directions suivantes :

- Détermination précise des gamma diffusés, en utlisant un code de transport,
- Etudes expérimentales sur centrales.

L'utilisation de sources de gamma s'avère une technique prometteuse.

Sur cette base, s'ouvre un champ d'application important que de nouvelles initiatives pourraient explorer. Ainsi, pourraient-être entreprises des études relatives à la mesure du niveau des générateurs de vapeur.

ANNEXE 1

activité γ du circuit primaire

Emetteurs γ en solution (unité : 3.7 10^{10} γ/T/S)

1 Produits de fission [0.25% de R.G.] et 100% de R.G.	0	200	400	600	800	1000	1300	1600	1700	2200	2800	5000
					ENERGIE (KeV)							
^{133}Xe	6.42 12.99											
^{135}Xe		2.58 439.7		$7.67\ 10^{-2}$ 13.07								
^{138}Xe	$3.21\ 10^{-2}$ 98.122	$1.92\ 10^{-1}$ 568.9	$1.1\ 10^{-1}$ 336.2	$3.21\ 10^{-3}$ 9.81	$1.37\ 10^{-2}$ 41.87	$1.56\ 10^{-2}$ 47.7	$3.21\ 10^{-3}$ 9.81	$8.56\ 10^{-3}$ 261.7	$8.98\ 10^{-2}$ 274.5	$1.62\ 10^{-3}$ 4.95		
$^{85}Kr_m$	$4.23\ 10^{-1}$ 194.25	$1.92\ 10^{-2}$ 37.79										
^{87}Kr	$2.04\ 10^{-4}$ 0.18		$2.52\ 10^{-1}$ 220.8	$2.67\ 10^{-3}$ 8.47	$4.33\ 10^{-2}$ 37.94	$5.85\ 10^{-3}$ 5.12	$8.14\ 10^{-3}$ 7.13	$1.17\ 10^{-2}$ 10.25	$1.48\ 10^{-2}$ 12.97	$7.33\ 10^{-2}$ 64.23	$4.58\ 10^{-3}$ 4.01	
^{88}Kr	$3.57\ 10^{-1}$ 204.49	$3.99\ 10^{-2}$ 22.86	$1.3\ 10^{-2}$ 7.45	$1.49\ 10^{-2}$ 8.53	$1.8\ 10^{-2}$ 10.31	6.2710^{-2} 35.92	1.7410^{-1} 99.67	$1.71\ 10^{-2}$ 9.79	$2.49\ 10^{-1}$ 142.63	$4.53\ 10^{-1}$ 259.48		
^{89}Kr	$1.22\ 10^{-3}$ 15.41	$1.75\ 10^{-2}$ 220.98	$2.14\ 10^{-2}$ 270.2	$7.19\ 10^{-3}$ 90.79	$1.13\ 10^{-2}$ 142.69	$6.76\ 10^{-2}$ 853.6	$1.35\ 10^{-2}$ 170.47	$5.48\ 10^{-3}$ 691.97	$3.65\ 10^{-3}$ 460.89	$1.10\ 10^{-2}$ 138.9	$7.92\ 10^{-3}$ 100.01	
^{131}I		$1.05\ 10^{-2}$ 142.18 $1.45\ 10^{-1}$ 1972	$1.4\ 10^{-2}$ 190.4 $3.5\ 10^{-3}$ 47.6									
^{132}I	$2.7\ 10^{-3}$ 174.62 $7.7\ 10^{-4}$ 49.80	$3.39\ 10^{-2}$ 2192.49										

- 1ère valeur 0.25 % de ruptures de gaines ($\nu g = 10^{-4}$)
- 2ème valeur 100 % de ruptures de gaines

1 Produits de fission [0.25% de R.G.] et 100% de R.G.	0 – 200	200 – 400	400 – 600	600 – 800	800 – 1000	1000 – 1300	1300 – 1600	1600 – 1700	1700 – 2200	2200 – 2800	2800 – 5000
	ENERGIE (KeV)										
^{133}I	$8.26\ 10^{-5}$ 2.3	$6.61\ 10^{-4}$ 18.41	$7.27\ 10^{-2}$ 2024.23	$2.73\ 10^{-3}$ 76.02	$5.04\ 10^{-3}$ 140.34	$3.72\ 10^{-3}$ 103.58	$8.43\ 10^{-3}$ 234.73				
^{135}I	$3.06\ 10^{-3}$ 176	$1.84\ 10^{-3}$ 105.83	$3.89\ 10^{-3}$ 223.74	$5.51\ 10^{-4}$ 31.69	$2.82\ 10^{-3}$ 162.20	$2.05\ 10^{-2}$ 1179.08	$3.67\ 10^{-3}$ 211.08	$6.73\ 10^{-3}$ 387.08	$4.28\ 10^{-4}$ 24.62	$4.9\ 10^{-4}$ 28.18	

^{134}Cs			$8.26\ 10^{-3}$ 44.69	$3.44\ 10^{-2}$ 186.13	$3.32\ 10^{-3}$ 17.96	$1.06\ 10^{-3}$ 5.74					
^{137}Cs				$1.79\ 10^{-2}$ 304.55							
^{138}Cs	$1.09\ 10^{-2}$ 35.85	$1.13\ 10^{-2}$ 37.17	$2.13\ 10^{-1}$ 700.6	$4.53\ 10^{-3}$ 14.9	$2.54\ 10^{-2}$ 83.55	$1.45\ 10^{-1}$ 476.93	$3.58\ 10^{-1}$ 1177.53	$3.17\ 10^{-3}$ 10.43	$1.81\ 10^{-3}$ 5.95	$1.09\ 10^{-1}$ 958.52	$3.04\ 10^{-3}$ 10
^{140}LA	$1.18\ 10^{-3}$ 43.91	$2.87\ 10^{-2}$ 1067.95	$6.76\ 10^{-2}$ 2515.46	$6.17\ 10^{-3}$ 229.59	$5.54\ 10^{-2}$ 2061.48		$1.4\ 10^{-1}$ 5209.52			$6.5\ 10^{-3}$ 241.87	$1.57\ 10^{-4}$ 4.91
TOTAL PF	7.25 2293.93	3.14 6826.88	$7.8\ 10^{-1}$ 6581.39	$1.78\ 10^{-1}$ 973.52	$2.08\ 10^{-1}$ 2698.34	$2.61\ 10^{-1}$ 2707.67	$7.1\ 10^{-1}$ 7119.94	$5.27\ 10^{-2}$ 1371.22	$3.59\ 10^{-1}$ 921.56	$6.7\ 10^{-1}$ 1096.13	$1.57\ 10^{-2}$ 118.93
2 Produits de corrosion dissous (après 10 cycles)											
^{51}Cr	$1.1\ 10^{-4}$										
^{54}Mn					$2.8\ 10^{-4}$						
^{59}Fe						$5.7\ 10^{-5}$					
^{58}Co					$3\ 10^{-3}$						
^{60}Co						$2.2\ 10^{-3}$	$2.2\ 10^{-3}$				
TOTAL Produits corrosion		$1.1\ 10^{-4}$			$3.3\ 10^{-3}$	$2.26\ 10^{-3}$	$2.2\ 10^{-3}$				

ANNEXE 2

MODULATION DE SOURCE

Pour simplifier la présentation nous considérerons une modulation sinusoïdale du signal source, bien qu'en pratique, nous serons conduits à une modulation par créneaux.

Soient :

a_1 : nombre moyen de coups par seconde dû à la source lorsque le collimateur variable est ouvert.
a_2 : fluctuation statistique du signal source.
b_1 : nombre de coups par seconde dû aux sources parasites.
b_2 : fluctuation statistique des sources parasites.
$\bar{q}$: charge électrique moyenne par gamma détecté.

Le signal vu par le détecteur est :

$$s(t) = a(t) + b(t)$$

avec $a(t) = \frac{a_1}{2} (\sin 2\pi\, fo.t + 1)\, \bar{q} + a_2(t)$

$b(t) = b_1.\bar{q} + b_2(t)$

Les densités spectrales de la partie aléatoire des signaux s'écrivent /12/ /13/

$$Pa_2(f) = a_1\, \bar{q}^2 \qquad f > 0$$
$$Pb_2(f) = 2b_1\, \bar{q}^2 \qquad f > 0$$

Les densités spectrales des signaux sont :

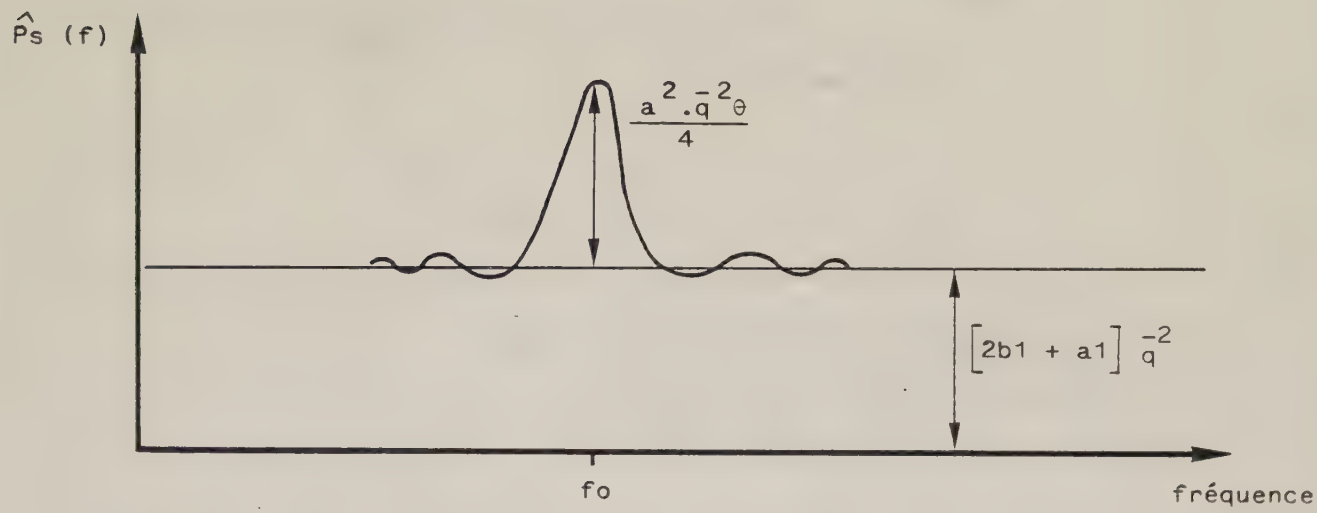
$$Pa\,(f) = \frac{a_1^2\, \bar{q}^2}{4}\, \delta\,(f - fo) + a_1\, q2 + \frac{a_1^2}{4}\, \bar{q}^2\, \delta\,(f)$$

$$Pb\,(f) = b_1^2\, \bar{q}^2\, \delta(f) + 2b_1\, \bar{q}^2$$

Pratiquement on estime la DSP sur un temps d'analyse fini θ. La DSP estimée $\widehat{Po}(f)$ du signal s(t) sera :

$$\widehat{Ps}(f) = q^{-2} \frac{a2}{4} \theta \left(\frac{\sin 2\pi\theta (f-fo)}{\eta\theta (f-fo)} \right)^2 + \widehat{Pa2}(f) + \widehat{Pb}(f)$$

qui présente l'allure suivante :



La valeur de $\widehat{Ps}(f)$ à la fréquence fo est :

$$\widehat{Ps}\ (fo) = \bar{q}^2 \left(\frac{a1^2}{4} \theta + \widehat{Pa2}\ (fo) + \widehat{Pb}\ (fo) \right)$$

Pour remonter à la densité et au taux de vide il faut mesurer a, pour ensuite utiliser la correspondance entre a1 et ρ ou α.

On a donc :

$$a_1 = \left(\frac{4}{q^2 \theta} \left(\widehat{Ps}\ (fo - \widehat{Pa2}\ (fo) - \widehat{Pb}\ (fo) \right) \right)^{1/2}$$

Comme on ne peut mesurer directement $\widehat{Pa2}(fo)$ ni $\widehat{Pb}(fo)$, on les estime en prenant la valeur moyenne du bruit blanc sur une largeur de bande B.

Notons :

$\hat{\hat{P}}a2 + \hat{\hat{P}}b$ cette estimation de $\hat{P}a2(fo) + \hat{P}b(fo)$

La précision relative pour un intervalle de confiance à 90 % sur une DSP estimée pendant une durée Θ, avec une résolution fréquentielle d'analyse Δ_ν est :

$$\frac{1.6}{\sqrt{\Theta \Delta \nu}}$$

a_1 est estimé par :

$$\hat{a_1} = \left(\frac{4}{\bar{q}^2 \Theta} \left(\hat{P}s(fo) - (\hat{\hat{P}}a_2 + \hat{P}b) \right)\right)^{1/2}$$

La précision relative sur a_1 est :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\hat{P}s(fo) + \Delta\hat{\hat{P}}a + \Delta\hat{\hat{P}}b}{\hat{P}s(fo) - (\hat{\hat{P}}a_2 + \hat{\hat{P}}b)} \right)$$

$\hat{P}s(fo) - (\hat{\hat{P}}a2 + \hat{\hat{P}}b)$ vaut en moyenne $\frac{a1^2 q^{-2} \Theta^{-2}}{4}$

$\Delta\hat{P}s(fo) = \Delta\hat{P}a2(fo) + \Delta\hat{P}_b(fo)$

soit :

$$\Delta\hat{P}s(fo) = \frac{\Delta\hat{P}a2(fo)}{\hat{P}a2\ (fo)}\ \hat{P}a2(fo) + \frac{\Delta\hat{P}b}{\hat{P}b}\ (fo)\ \hat{P}_b\ (fo)$$

et donc :

$$\Delta\hat{ps}(fo) \simeq \frac{1.6}{\sqrt{\Theta \Delta \nu}}\ (a_1\ \bar{q}^2 + b_1\ \bar{q}^2)$$

de même

$$\Delta\ (\hat{\hat{P}}a_2 + \hat{\hat{P}}b) = \frac{1.6}{\sqrt{\Theta\ B}}\ (a_1\ \bar{q}^2 + b_1\ \bar{q}^2)$$

finalement :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{1.6}{2}\ \left(\frac{1}{\sqrt{\Theta \Delta \nu}} + \frac{1}{\sqrt{\Theta B}} \right) \frac{a\ + b}{\Theta a_1{}^2/4}$$

soit :

$$\frac{\Delta a_1}{a_1} = 3.2 \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta v}} + \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \frac{a1 + b1}{a1^2} \theta^{-3/2}$$

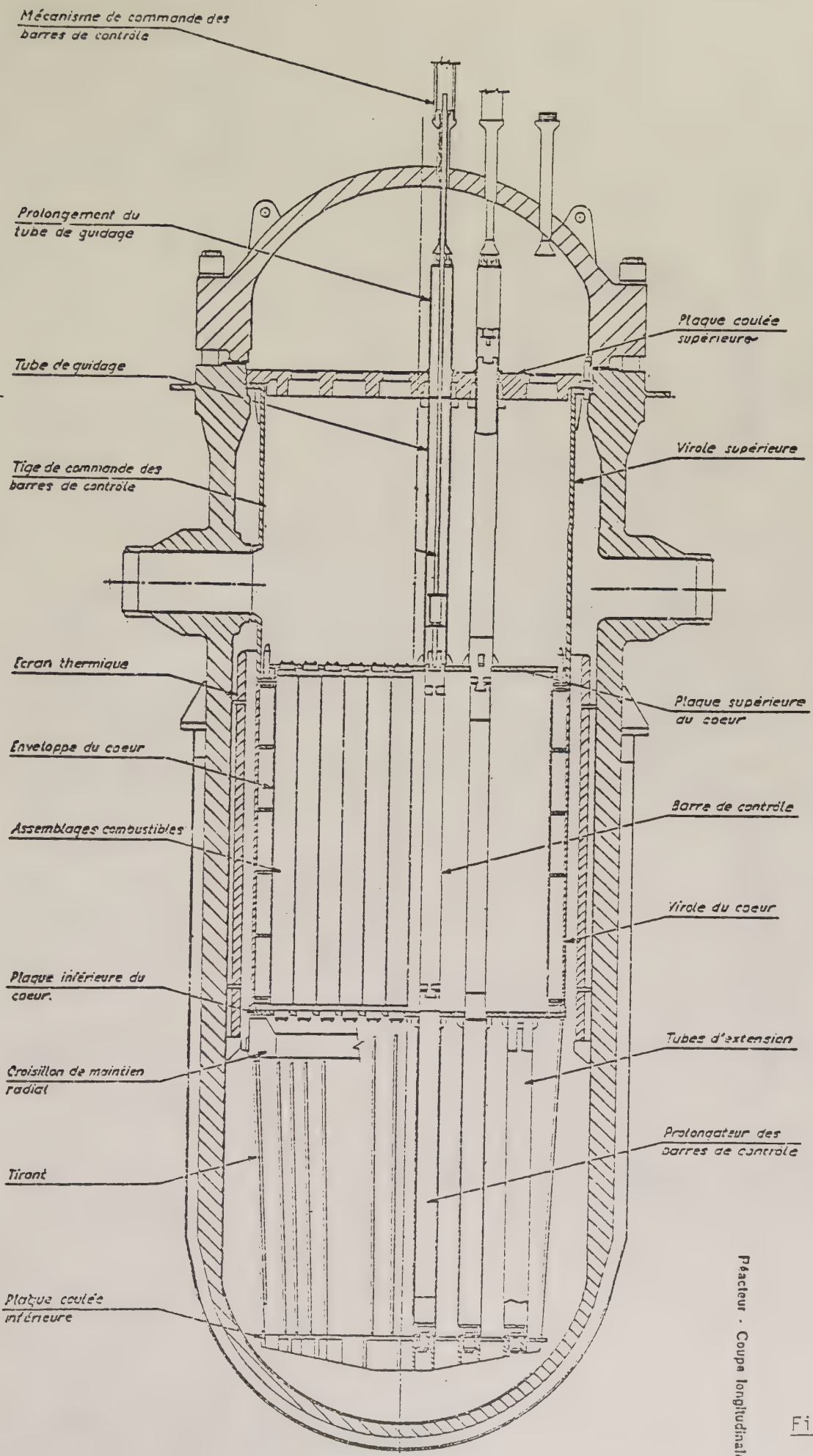
Le temps nécessaire pour mesurer a_1 avec une précision donnée $\frac{\Delta a1}{a1}$ est donc :

$$\theta = \left(3.2 \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta v}} + \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \frac{a_1 + b_1}{a_1^2} \; \frac{1}{\frac{\Delta a_1}{a_1}} \right)^{2/3}$$

REFERENCE SUR L'ANNEXE 2

/1/ - J. MAX
"Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques".
MASSON et Cie.

/2/ - P. BERNARD
Fluctuations neutroniques dans les réacteurs de puissance à eau sous pression.
Thèse du 3ème cycle 22.11.1978.



Réacteur - Coupe longitudinale

Figure N° 1

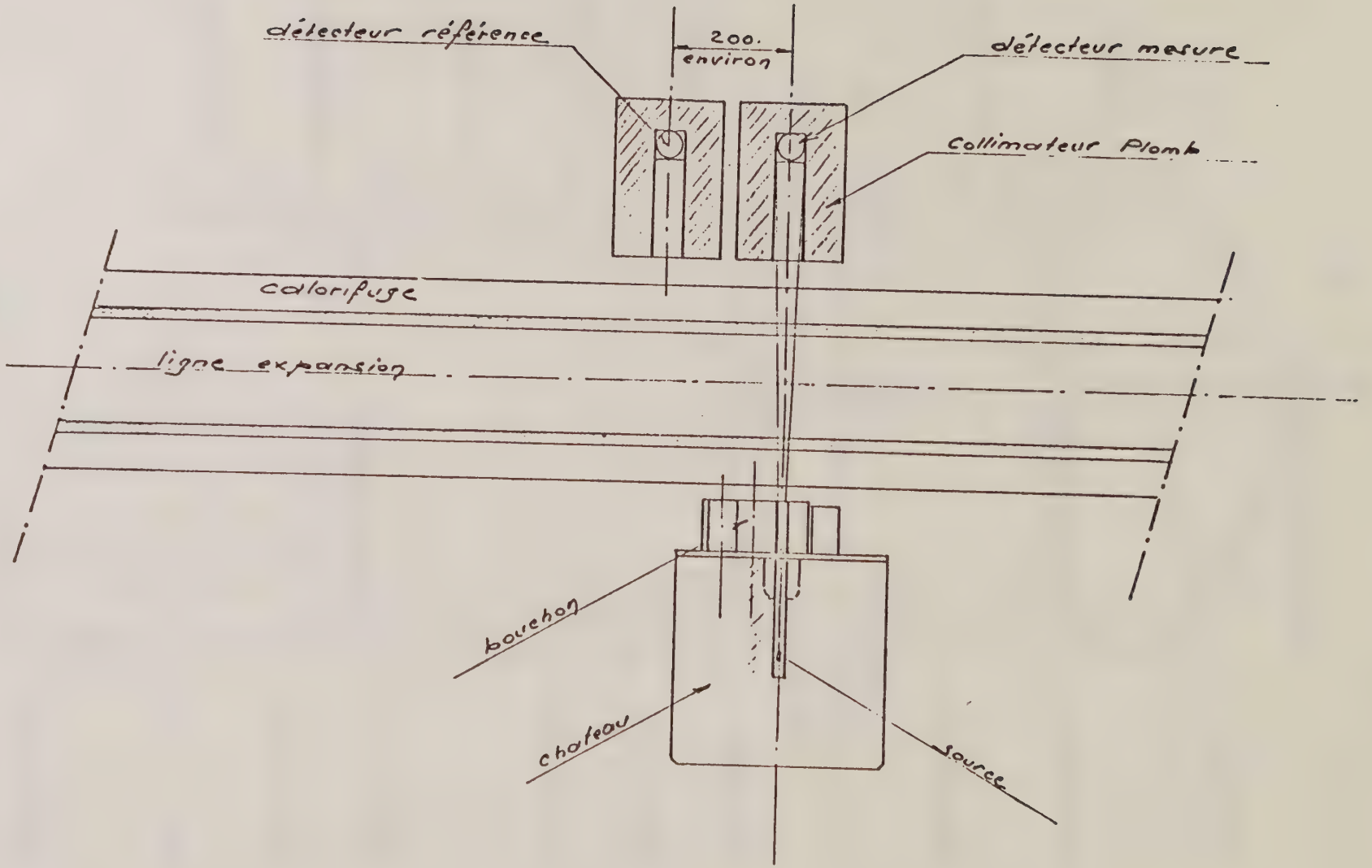


Figure N° 2 : PRINCIPE DU SYSTEME EN UN POINT DE MESURE

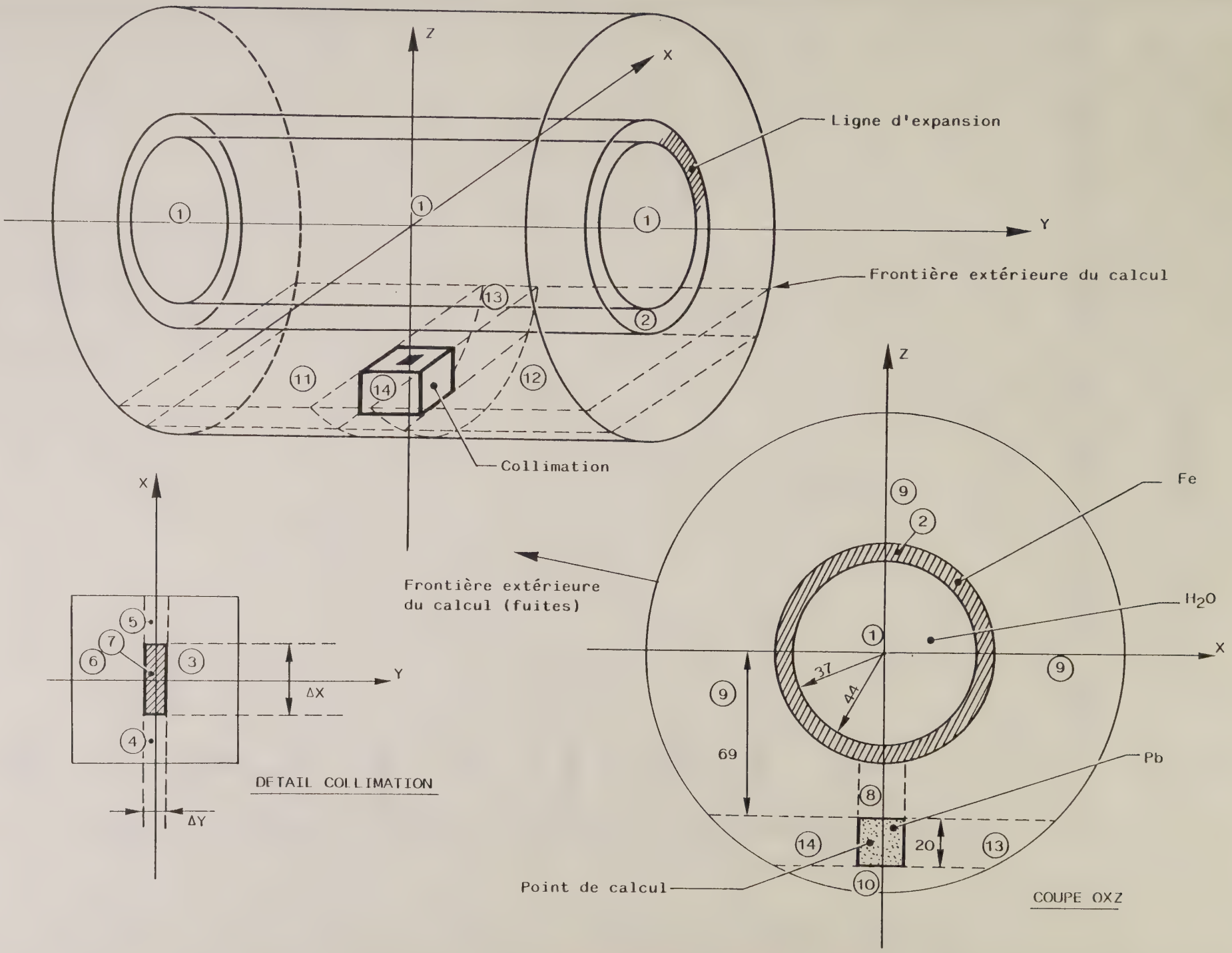
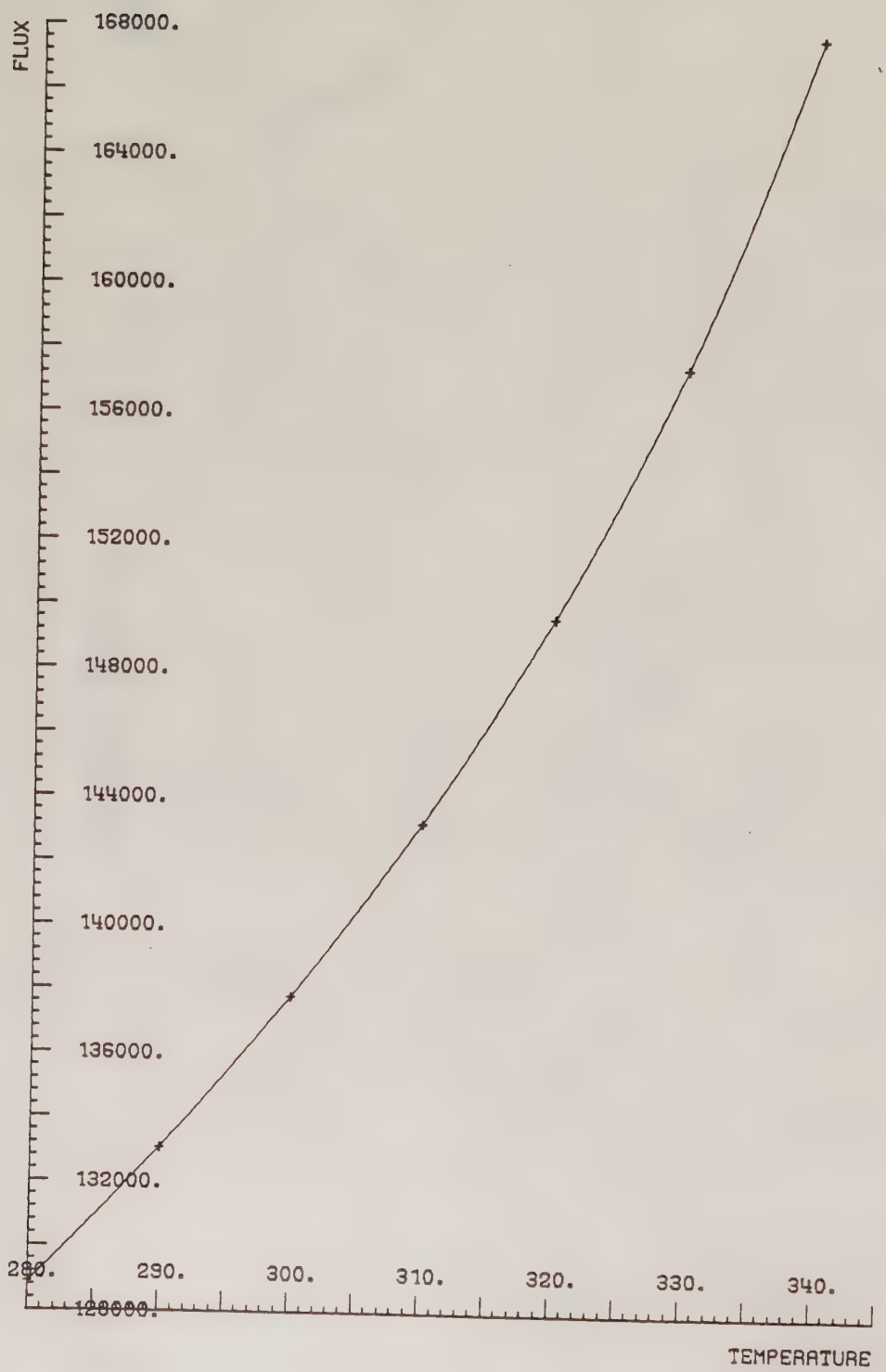


Figure 3 : Modèle MERCURE IV de la ligne d'expansion.
Description du maillage

Figure N° 4

FLUX SANS CHOC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE



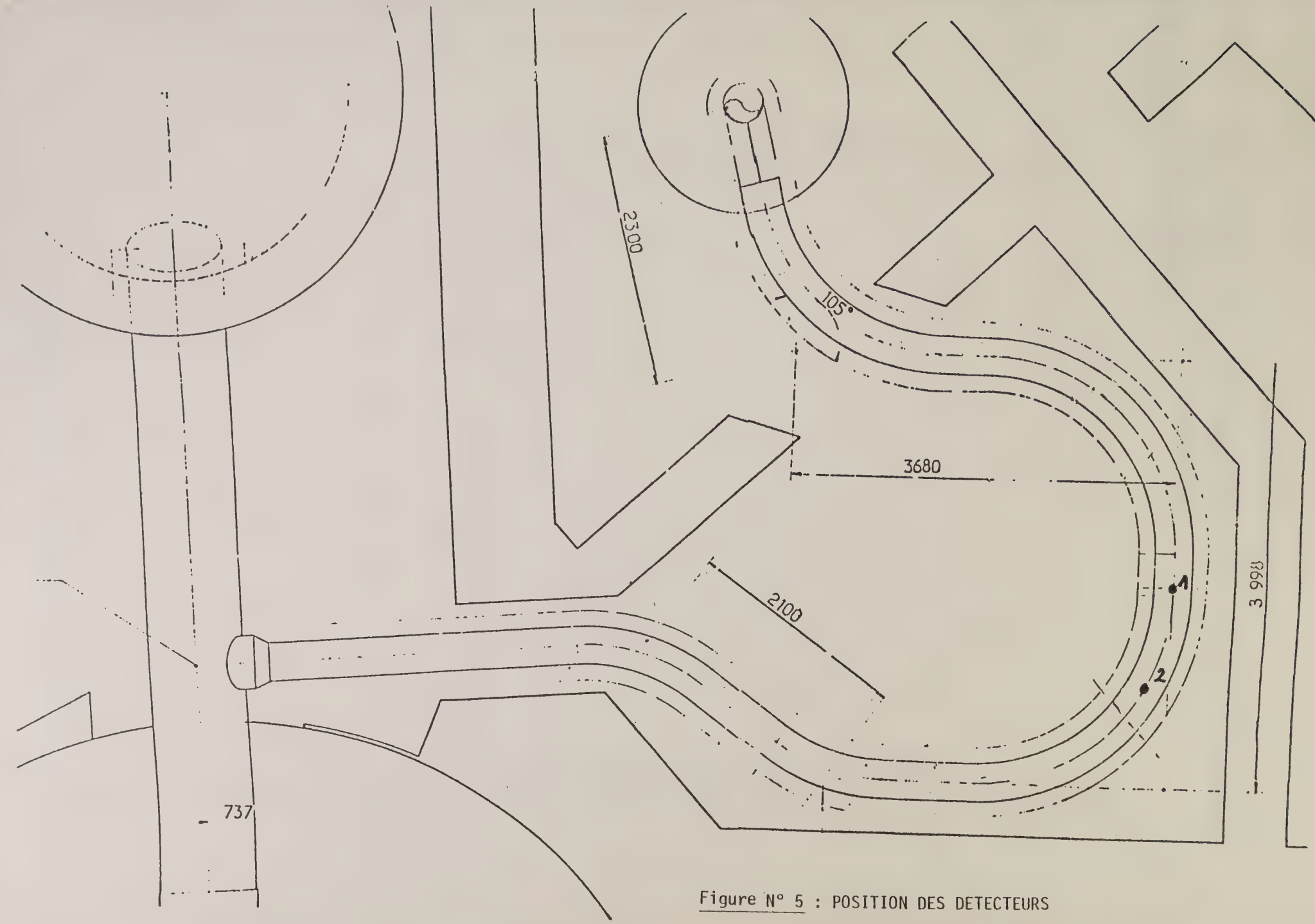
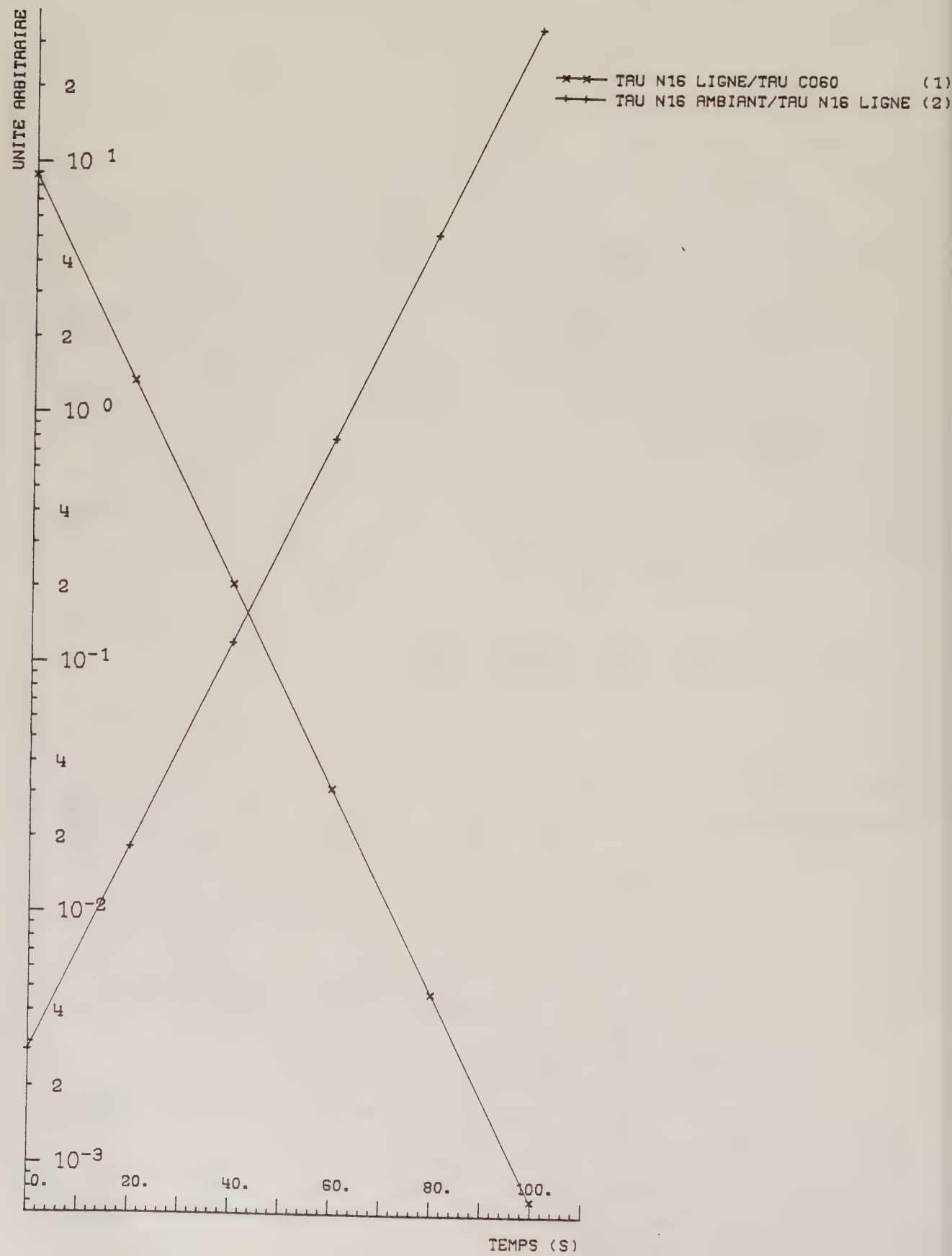


Figure N° 5 : POSITION DES DETECTEURS

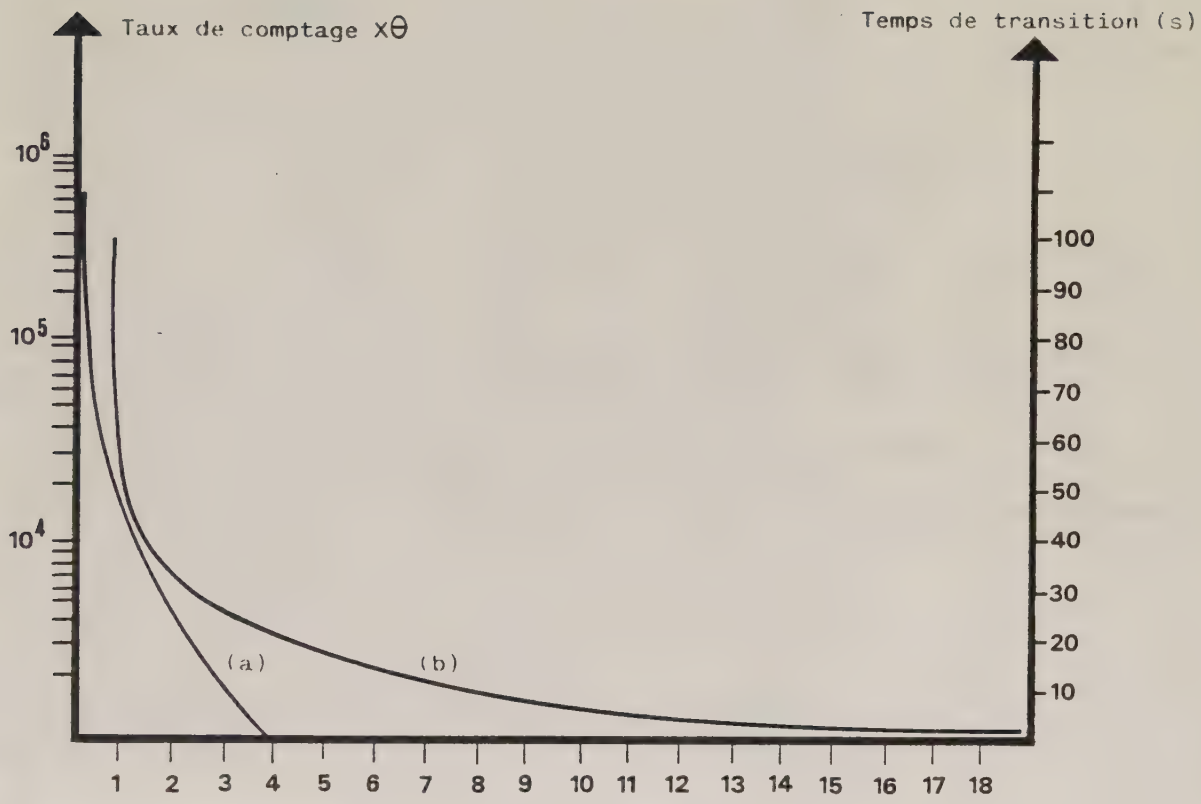
Figure N° 6

CONTRIBUTION N16 EN FONCTION DU TEMPS DE TRANSIT

TAUX DE COMPTAGE DU C060 : TAU C060 = 2.E5
1 AVEC COLLIMATION DECRITE FIGURE 9
2 AVEC PLAQUE DE 5CM DE PLOMB EN PLUS



F I G U R E 7



a) Incertitude sur la mesure de température, en fonction de Z x Θ (cobalt 60) sans contribution de N 16 dans la ligne).

b) Incertitude sur la mesure de température, en fonction du temps mis par l'azote 16 pour atteindre le point de mesure

Taux Co^{60} = 2.10^5 c/s Θ = 0.1 s soit Z x Θ = 2.10^4 chambre LND.

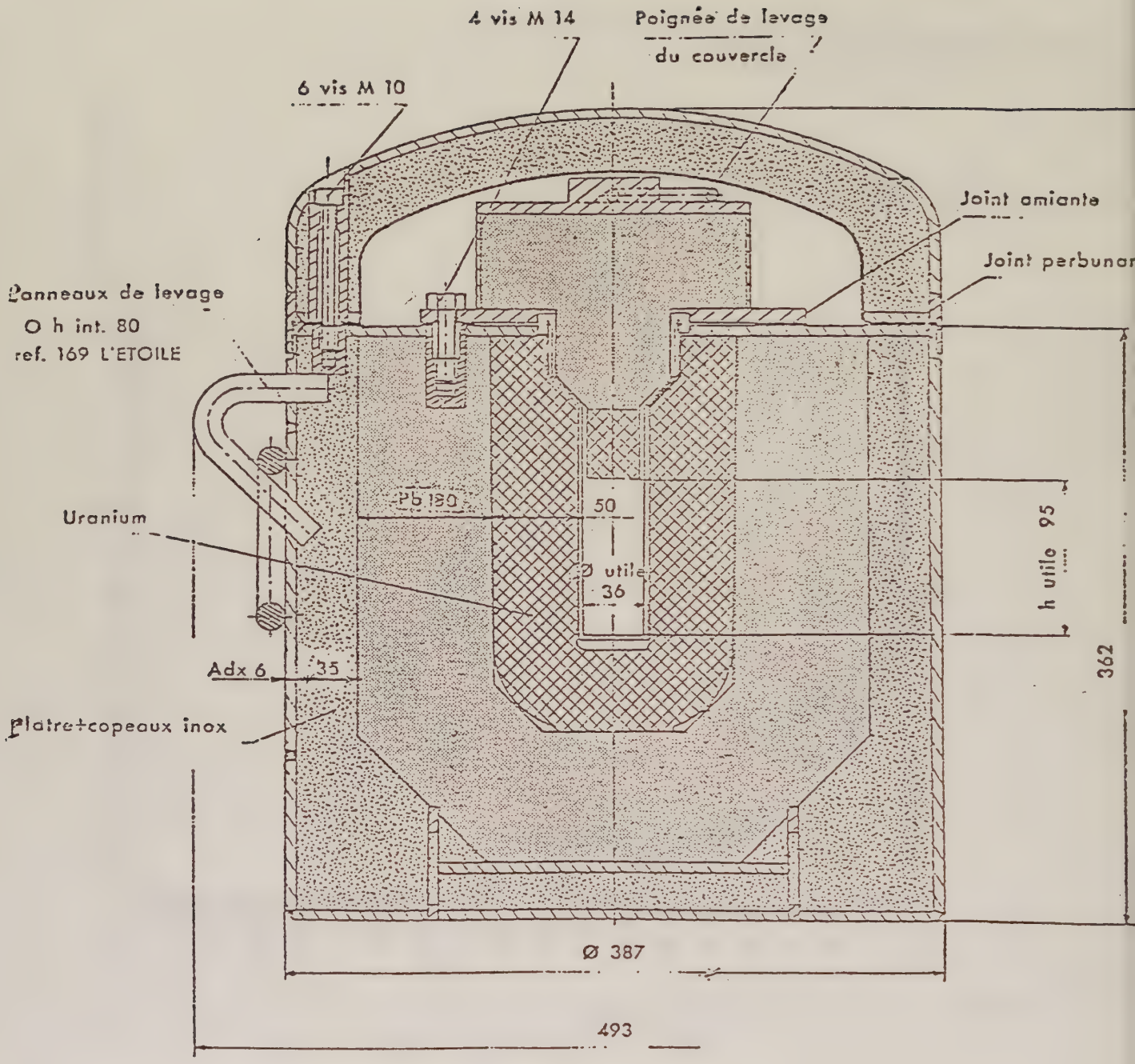


Figure N° 8 : CONTENEUR DE SOURCE

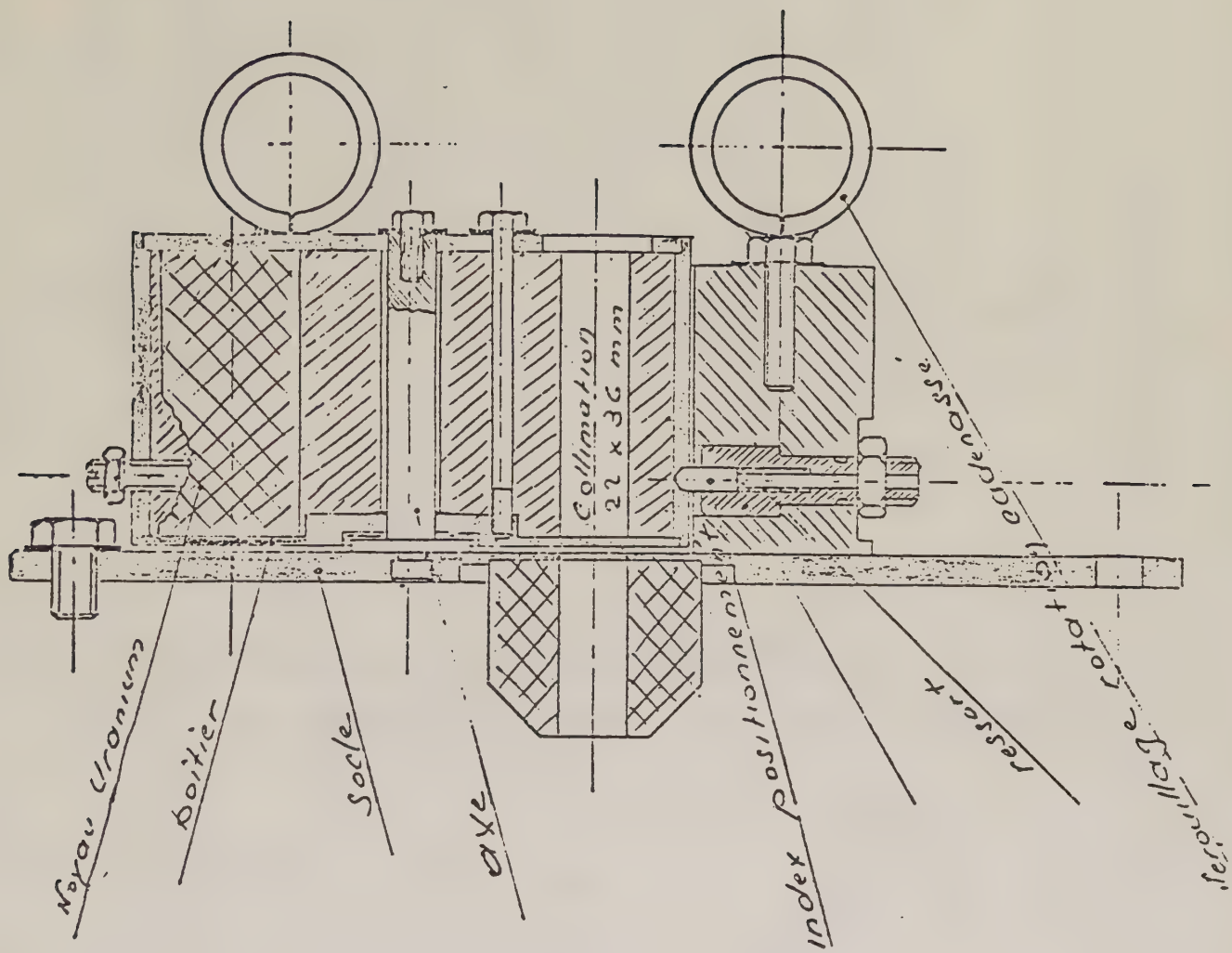


Figure N° 9 : COLLIMATEUR DE LA SOURCE

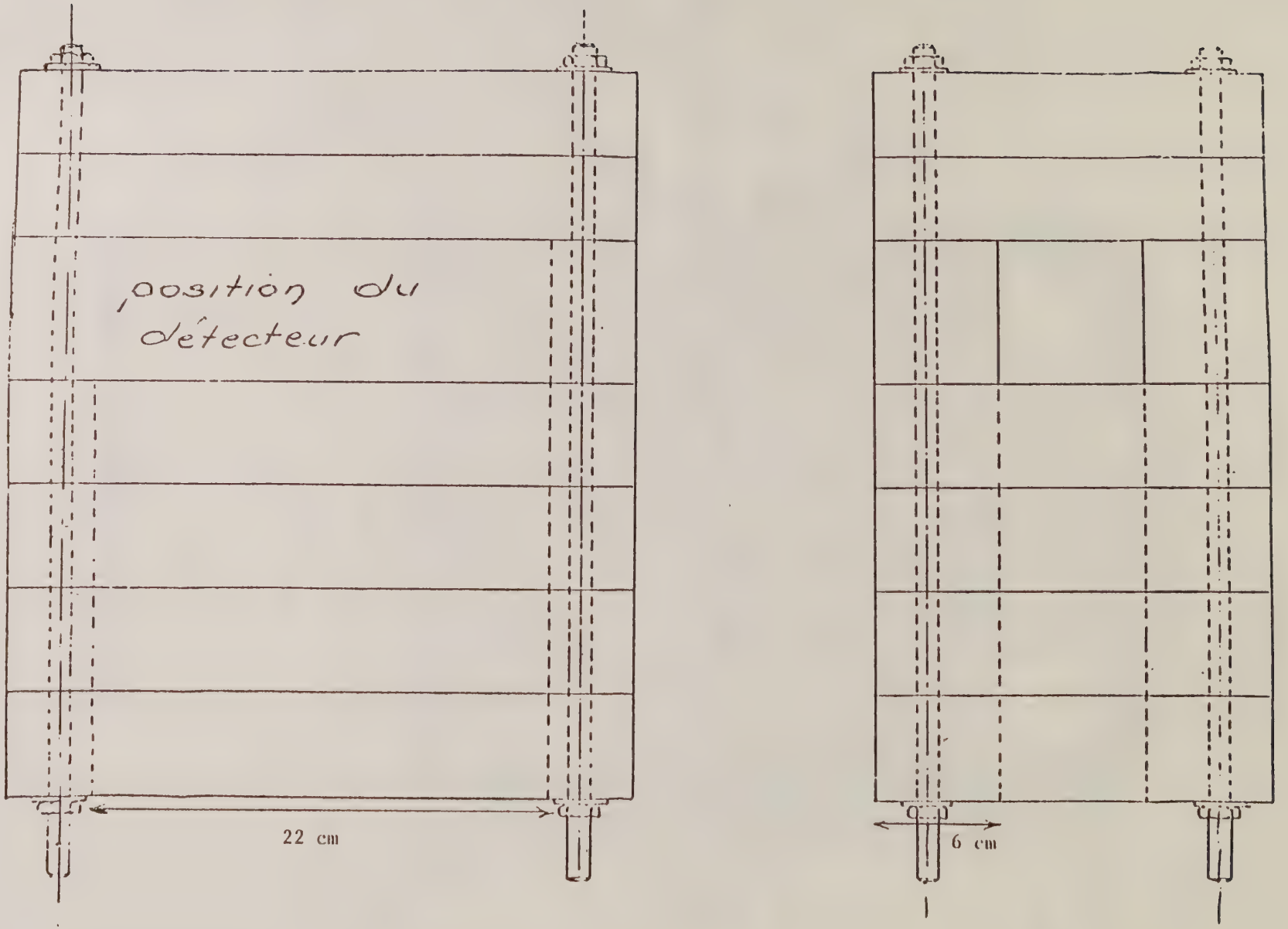


Figure N° 10 : COLLIMATEUR DU DETECTEUR

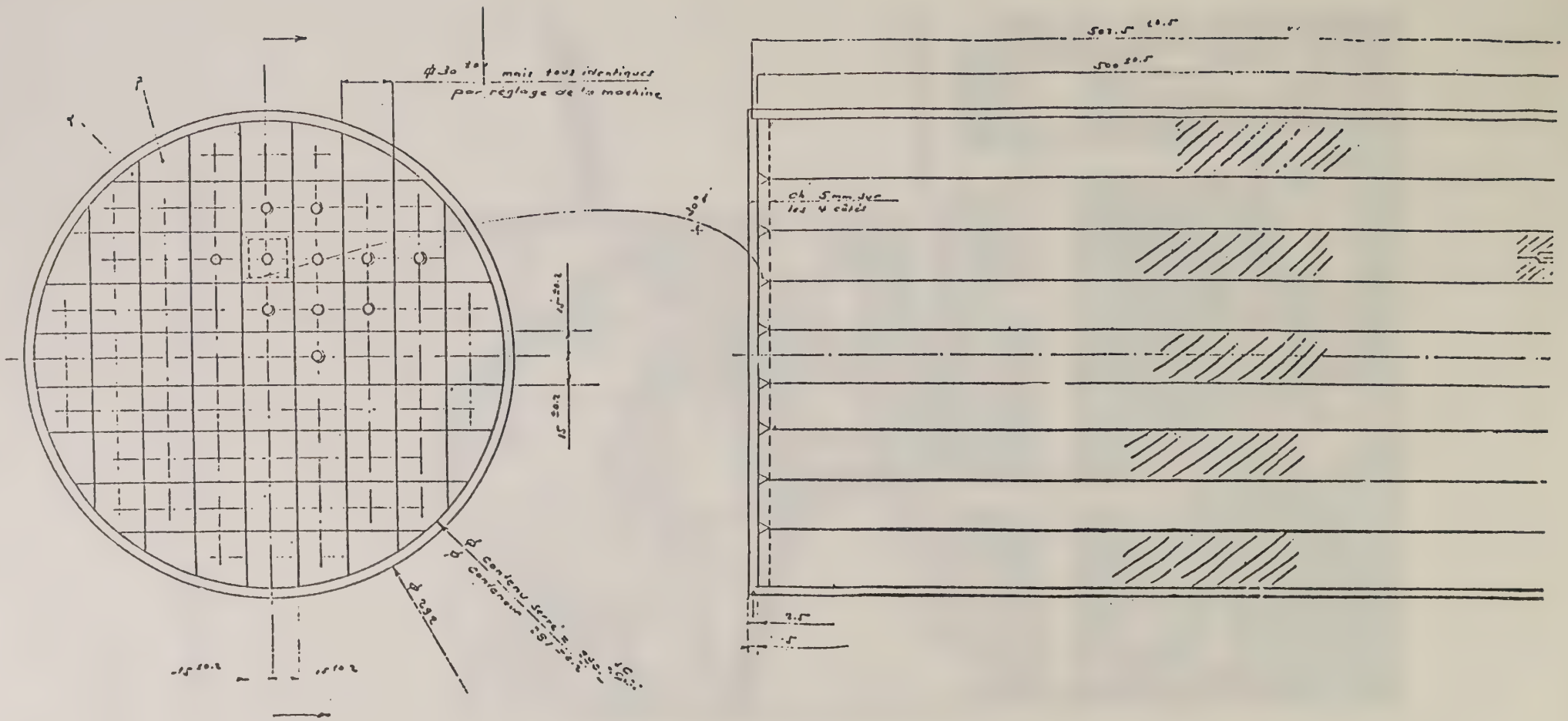


Figure N° 11 : CONFIGURATION DU CHARGEMENT DE LA TUYAUTERIE PAR DES BLOCS DE POLYETHYLENE

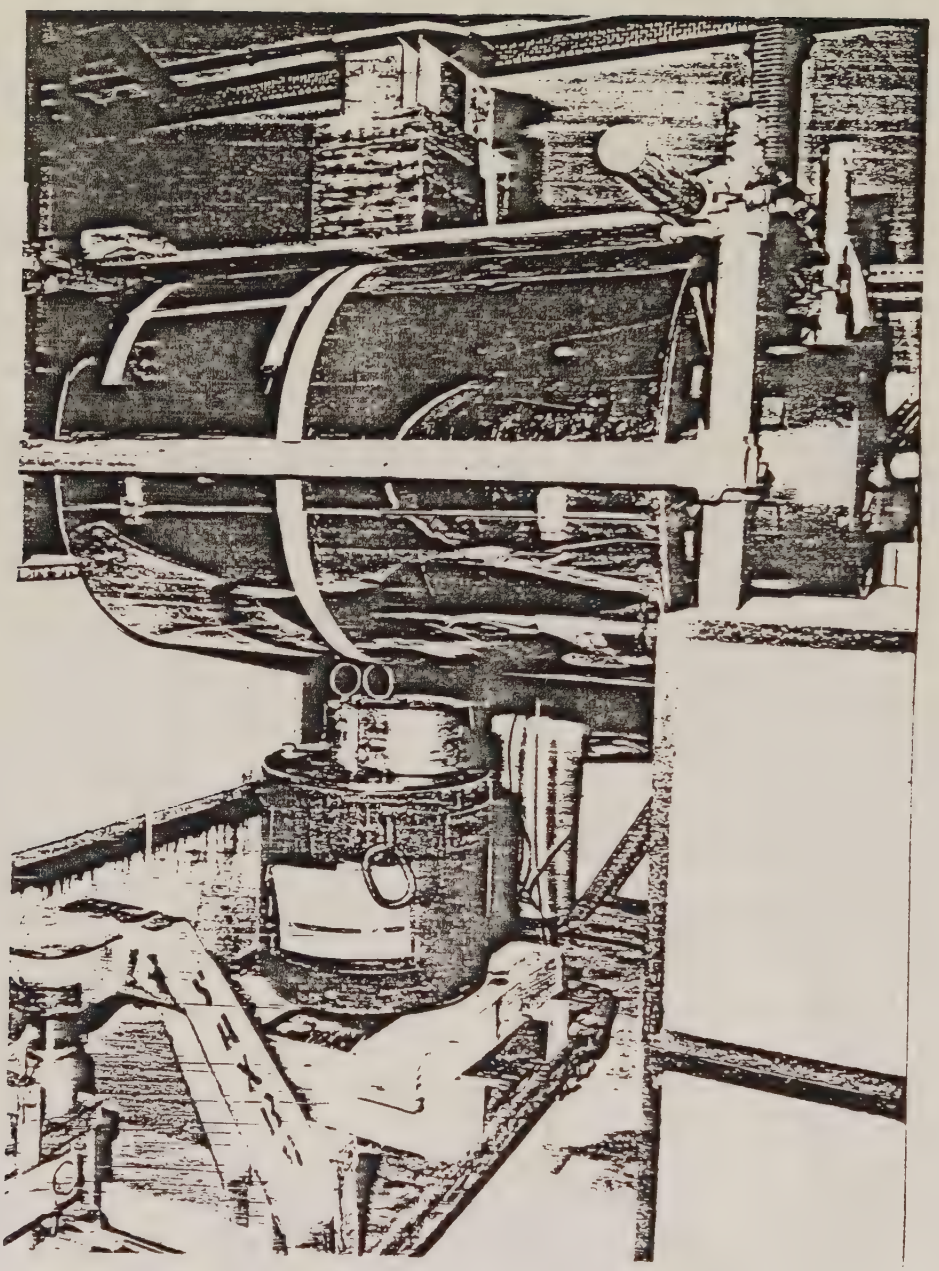
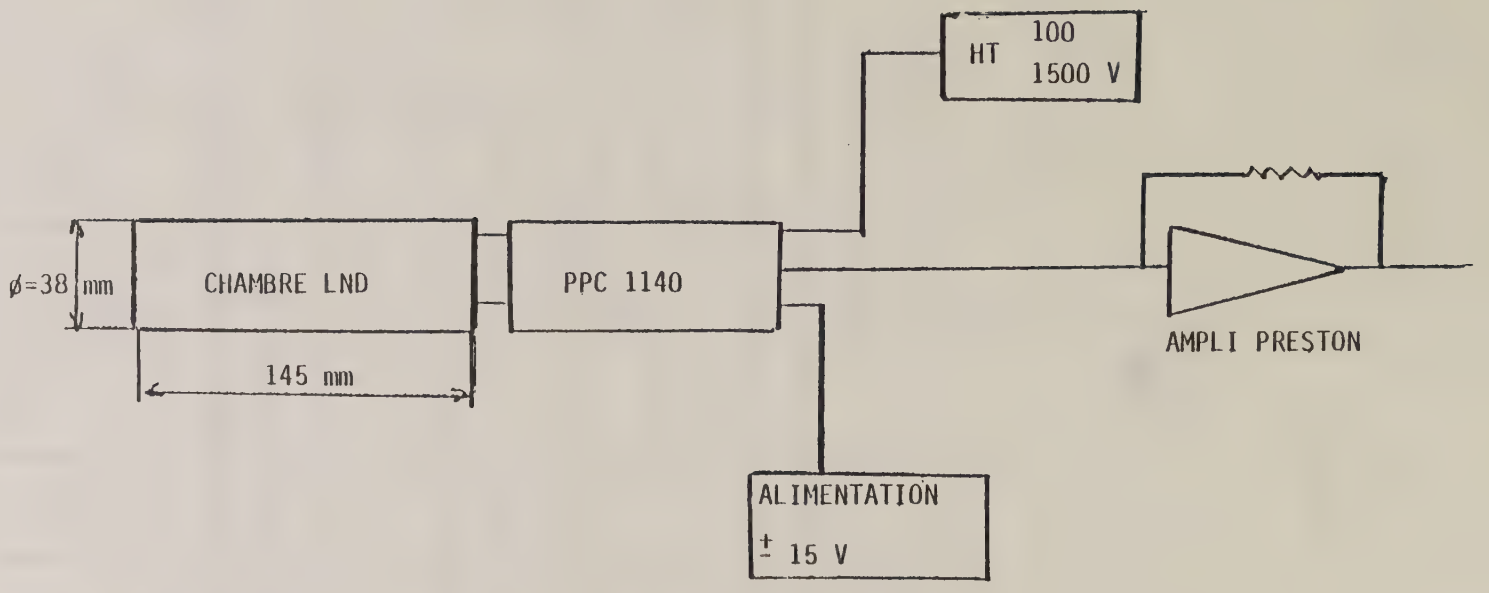


Figure N° 12 : MAQUETTE DE LA LIGNE D'EXPANSION



MESURE AVEC CHAMBRE D'IONISATION

Figure N° 13

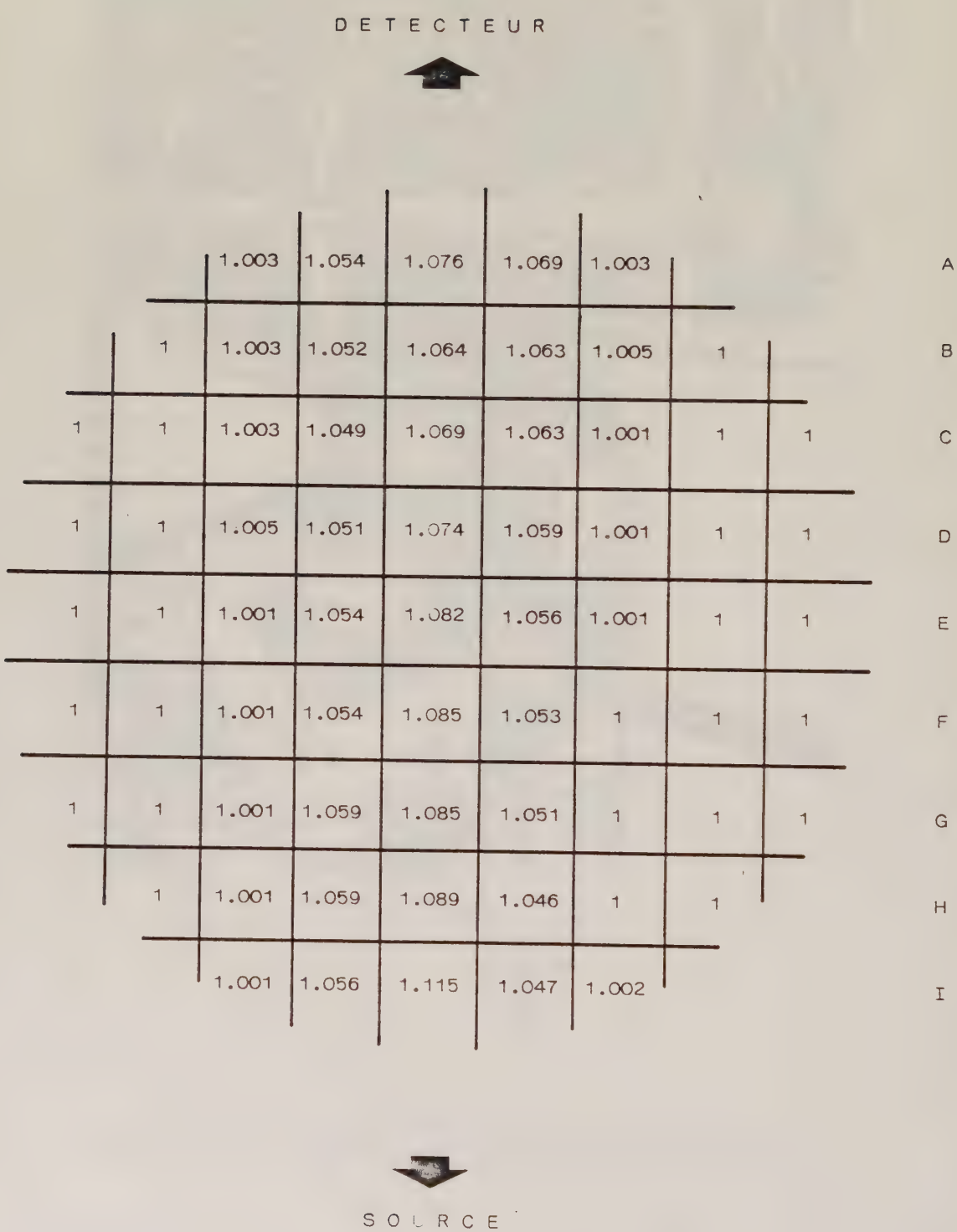

DETECTEUR
1.003 1.054 1.076 1.069 1.003
1 1.003 1.052 1.064 1.063 1.005 1
1 1 1.003 1.049 1.069 1.063 1.001 1 1
1 1 1.005 1.051 1.074 1.059 1.001 1 1
1 1 1.001 1.054 1.082 1.056 1.001 1 1
1 1 1.001 1.054 1.085 1.053 1 1 1
1 1 1.001 1.059 1.085 1.051 1 1 1
1 1.001 1.059 1.089 1.046 1 1
1.001 1.056 1.115 1.047 1.002
A
B
C
D
E
F
G
H
I
SOURCE

Figure 14

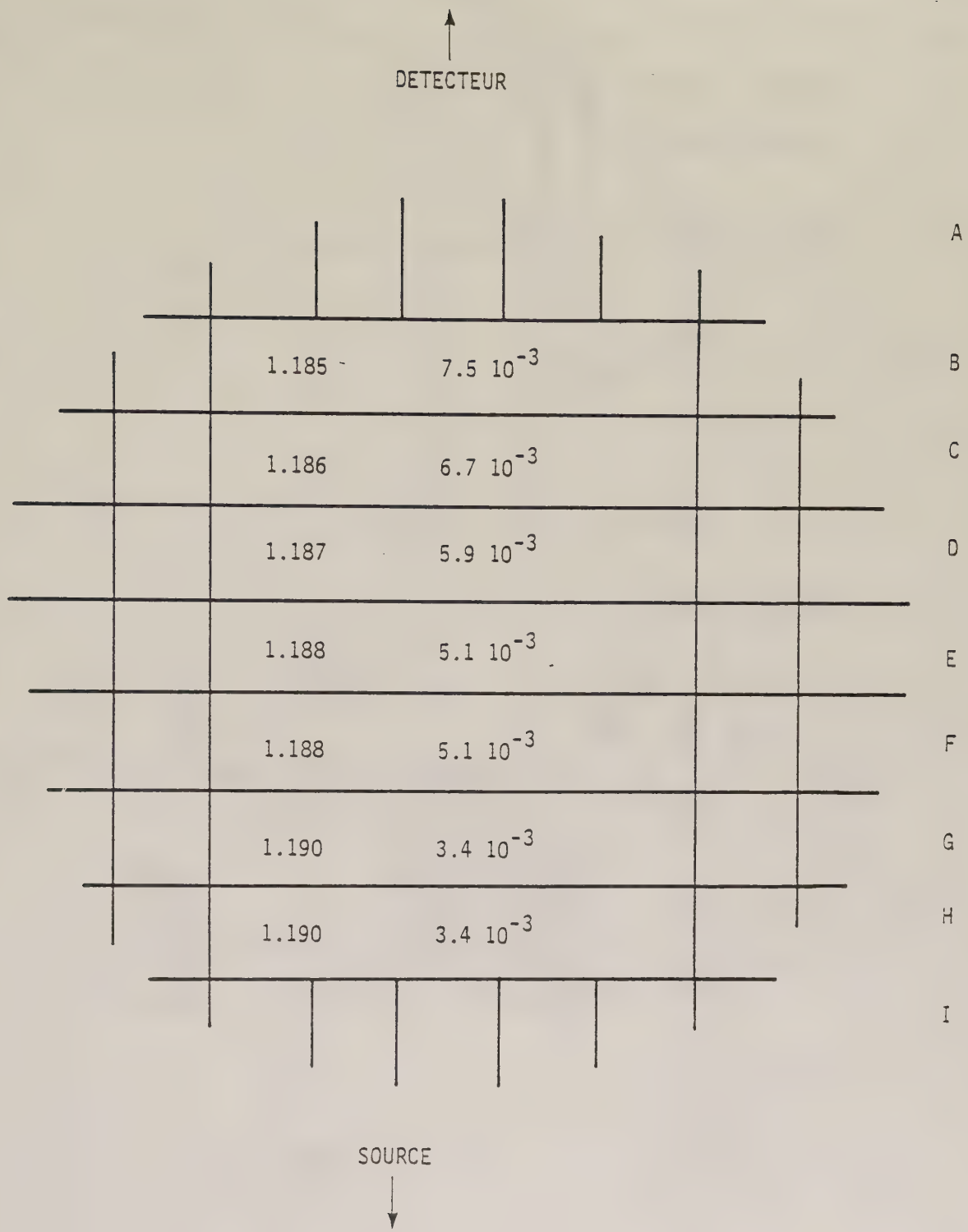

DETECTEUR
A
1.185
7.5 10-3
B
1.186
6.7 10-3
C
1.187
5.9 10-3
D
1.188
5.1 10-3
E
1.188
5.1 10-3
F
1.190
3.4 10-3
G
1.190
3.4 10-3
H
I
SOURCE

Figure N° 15

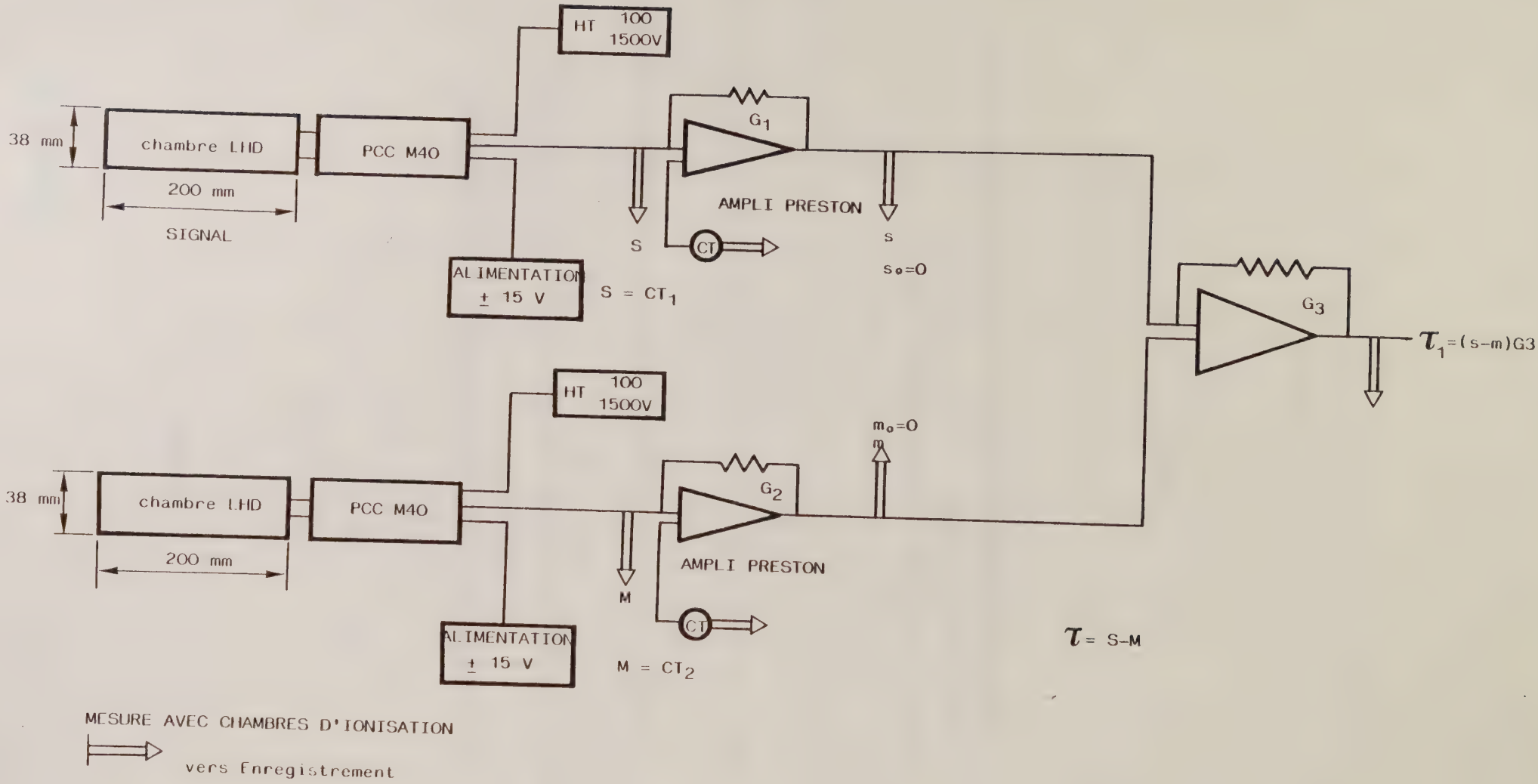

HT 100 1500V
38 mm
chambre LHD
PCC M40
200 mm
SIGNAL
G1
AMPLI PRESTON
S
CT
s
s₀=0
ALIMENTATION ± 15 V
S = CT1
G3
τ1=(s-m)G3
HT 100 1500V
m₀=0
m
38 mm
chambre LHD
PCC M40
G2
200 mm
AMPLI PRESTON
M
CT
ALIMENTATION ± 15 V
M = CT2
τ = S-M
MESURE AVEC CHAMBRES D'IONISATION
vers Enregistrement

FIGURE 16

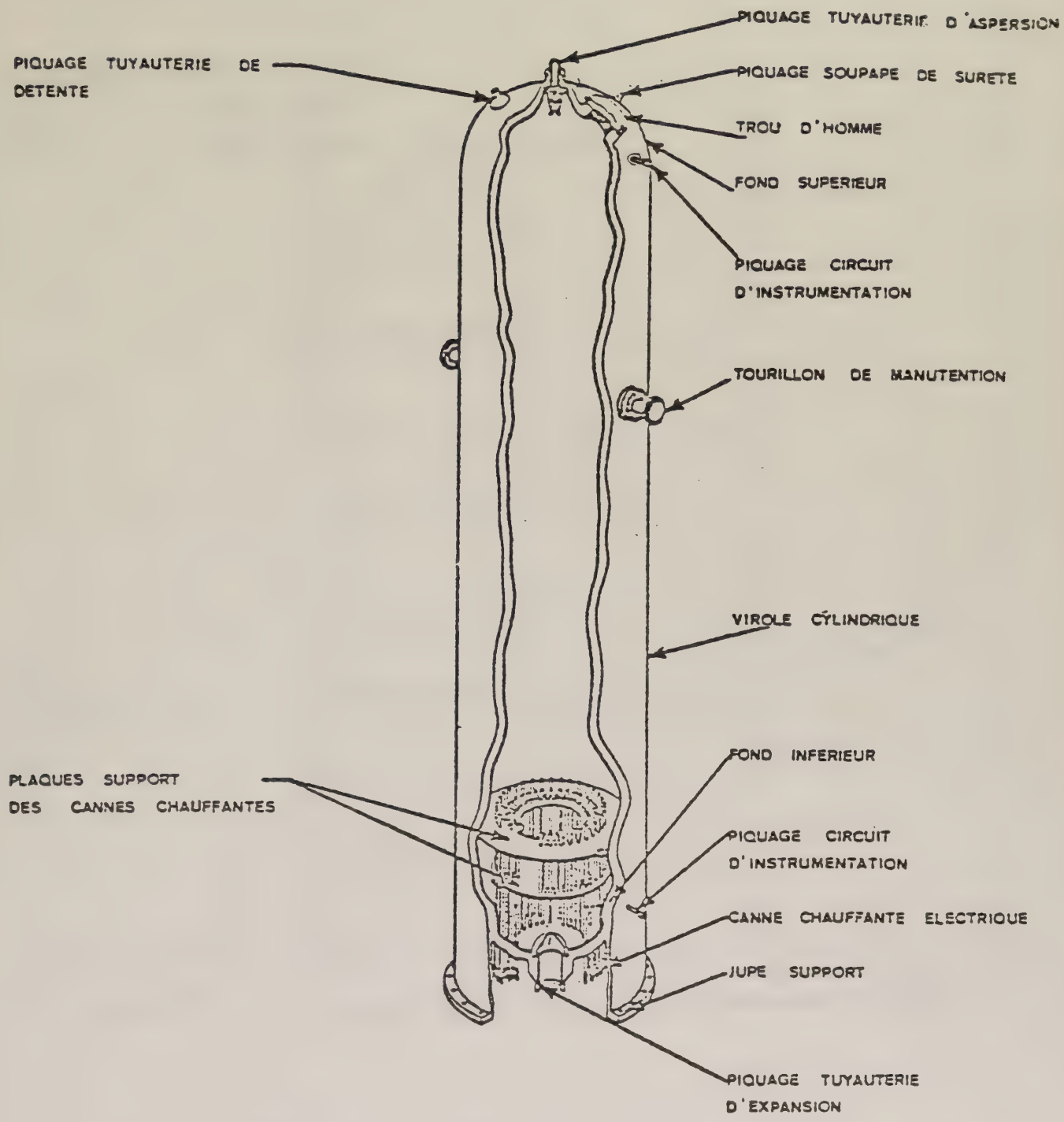


Figure N° 17 : PRESSURISEUR

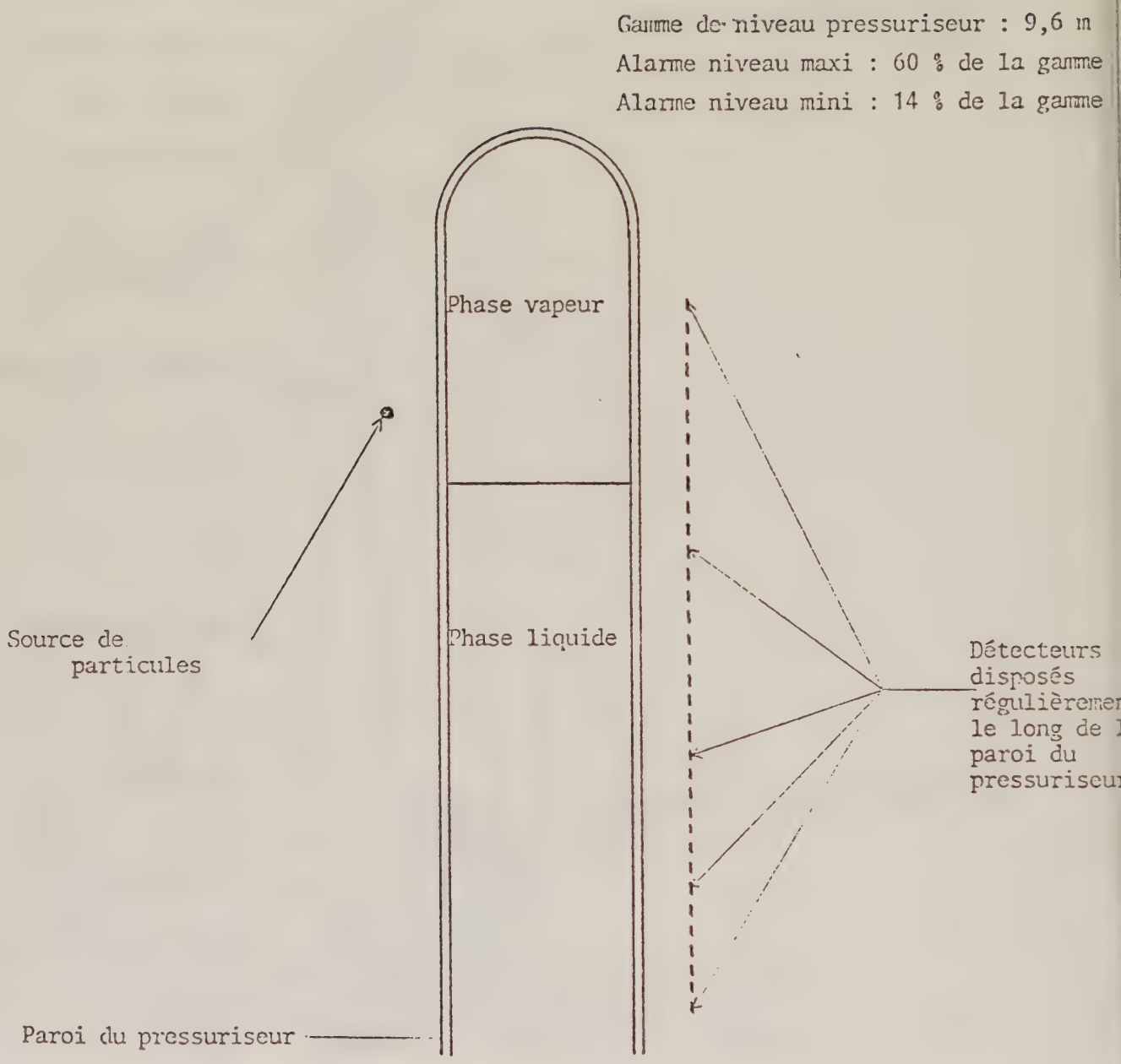


Figure 18: Principe de la méthode de détermination du niveau par transmission de particules.

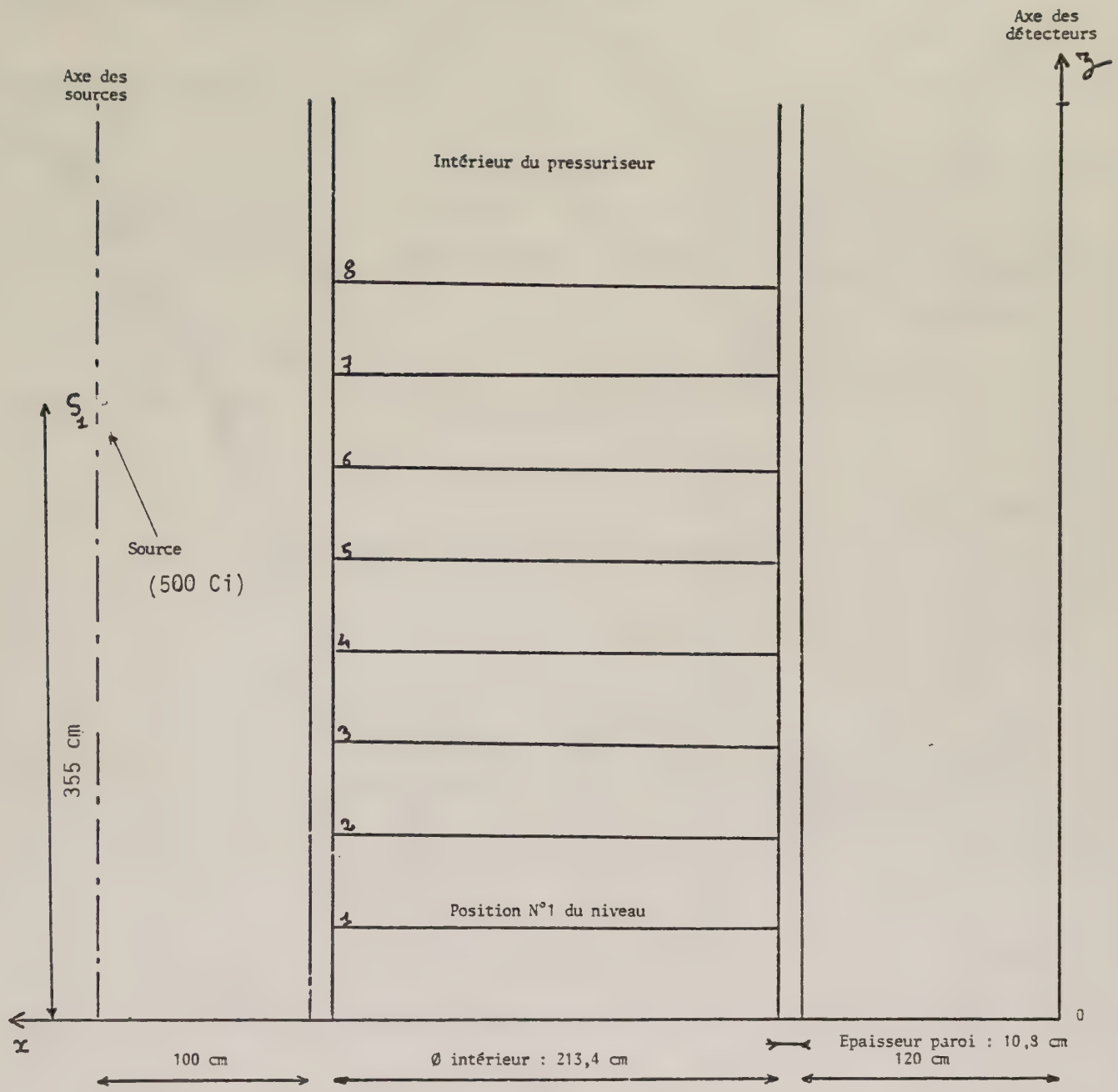


Figure N° 19 : DISPOSITION DES SOURCES ET DES DETECTEURS CORRESPONDANT A LA FIGURE 20 DONNANT LA DISTRIBUTION AXIALE DU FLUX POUR DIVERSES POSITIONS DU NIVEAU (REPEREES DE 1 à 8)

REPARTITION AXIALE DU FLUX SANS CHOC POUR DIFFERENTS NIVEAUX

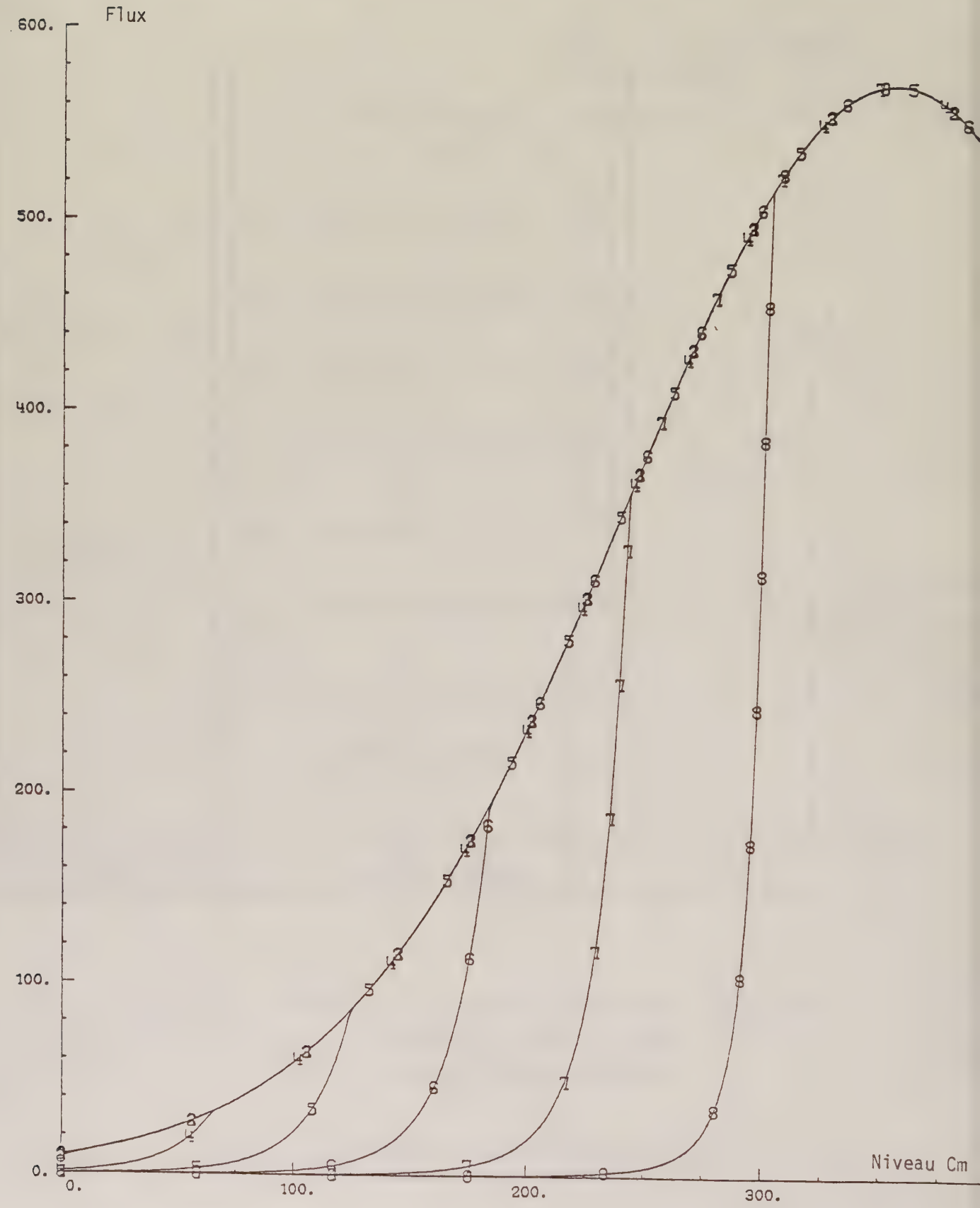
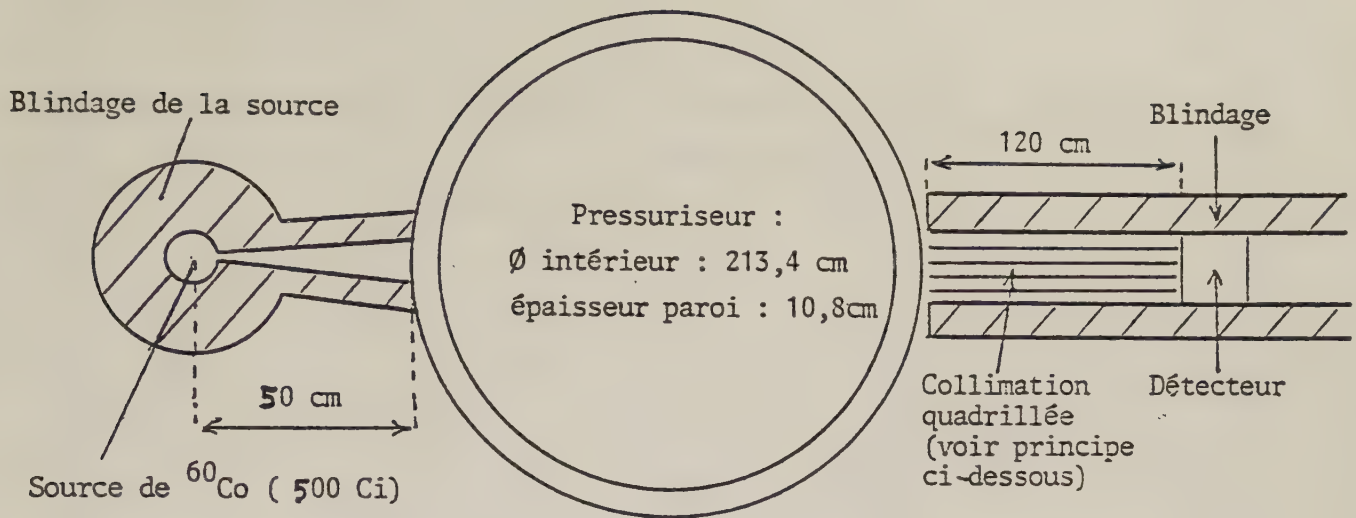
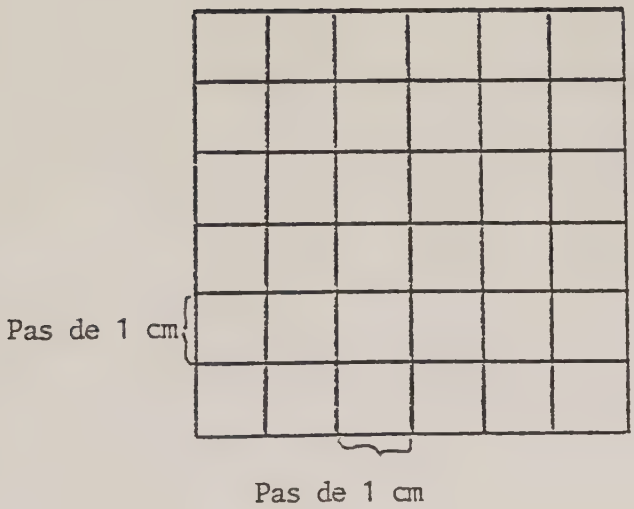


Figure N° 20



Disposition de la source et du détecteur



Réseau de lames de fer d'épaisseur 2 mm et de 120 cm de long

Principe de la collimation "quadrillée"

Figure N° 21

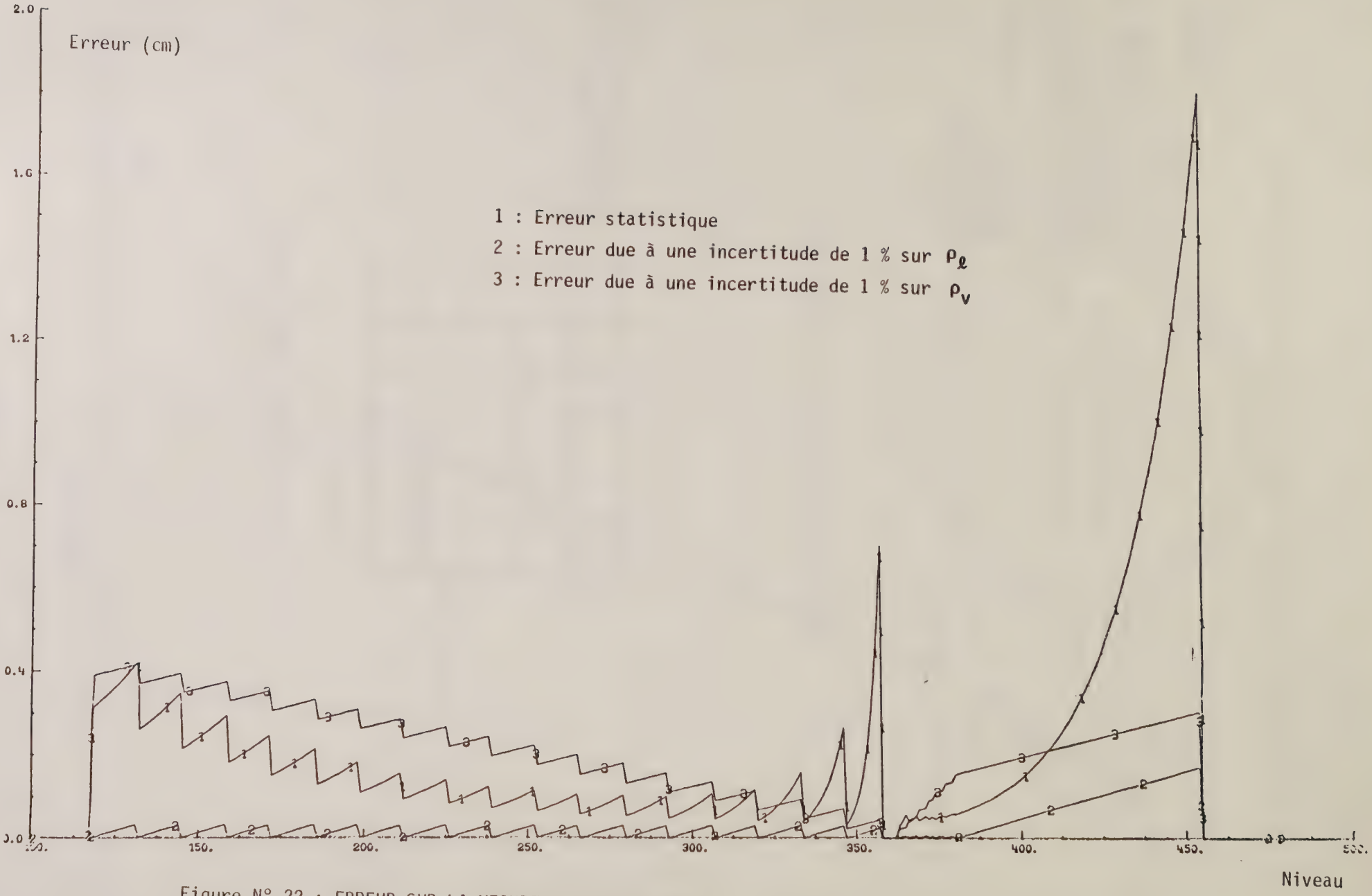


Figure N° 22 : ERREUR SUR LA MESURE DU NIVEAU (cm)

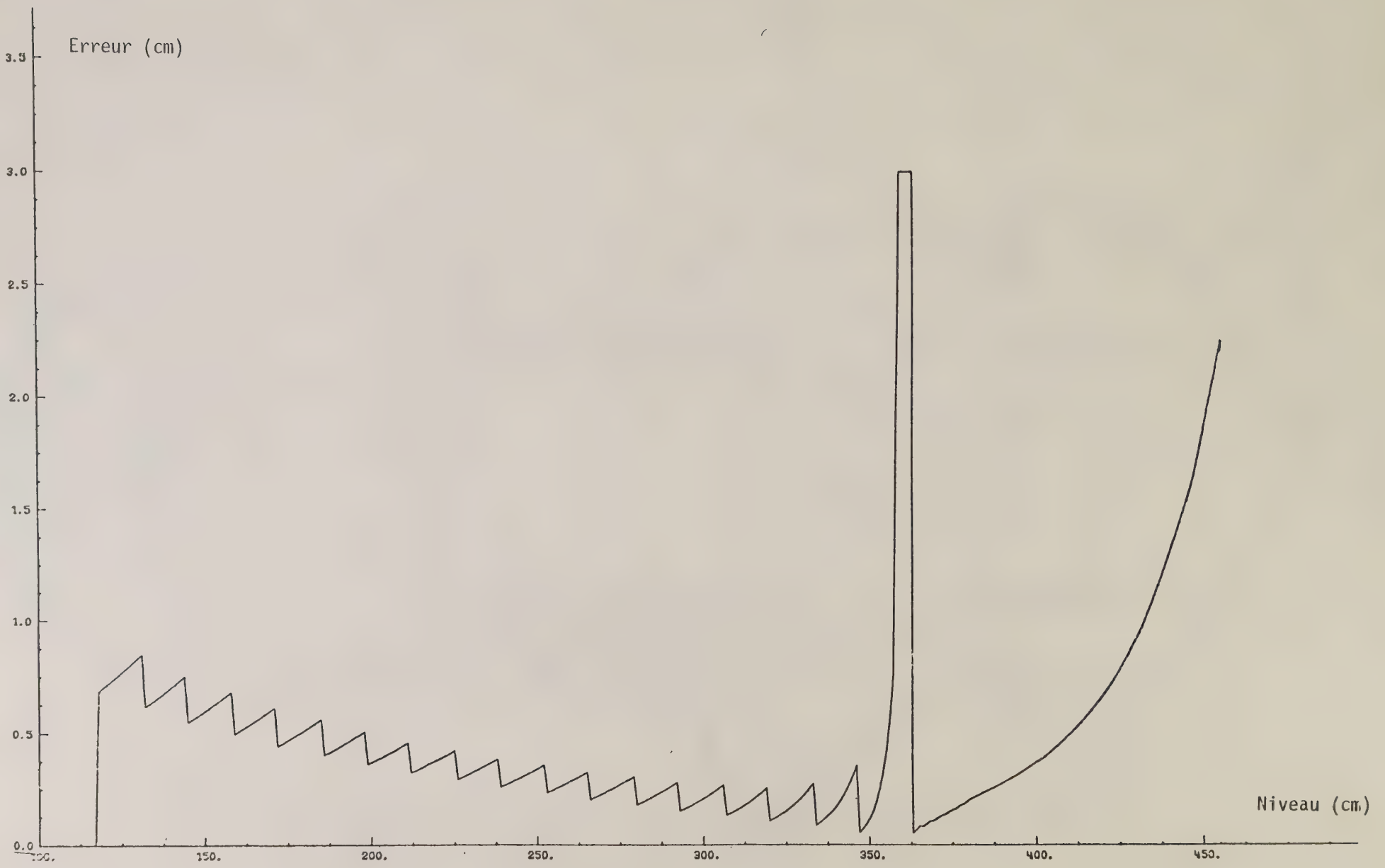
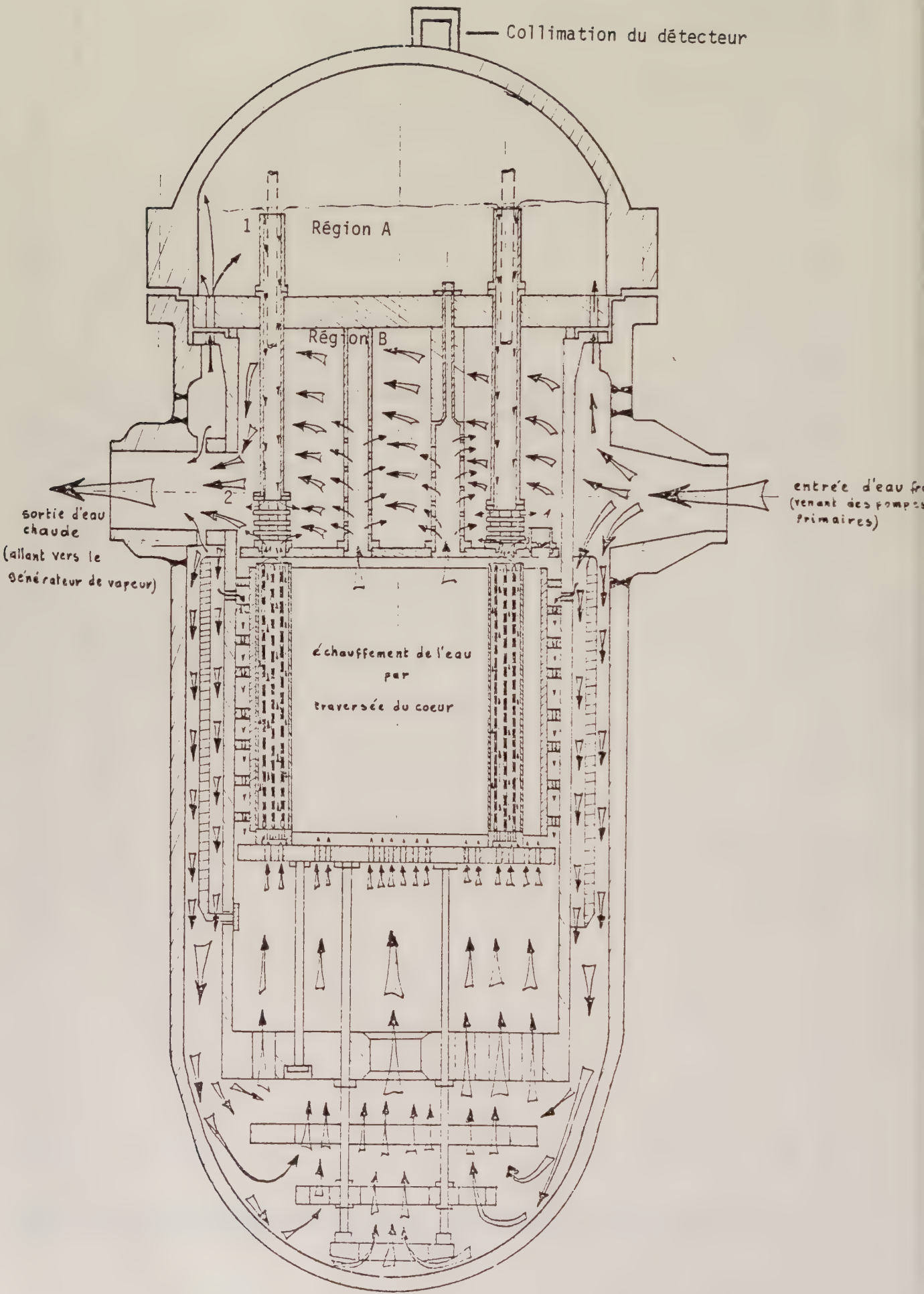


Figure N° 23 : ERREUR SUR LA MESURE DU NIVEAU EN FONCTION DU NIVEAU

Figure N° 24


Collimation du détecteur
1
Région A
Région B
2
sortie d'eau chaude
(allant vers le Générateur de vapeur)
entrée d'eau fr
(venant des pompes
primaires)
échauffement de l'eau par traversée du coeur

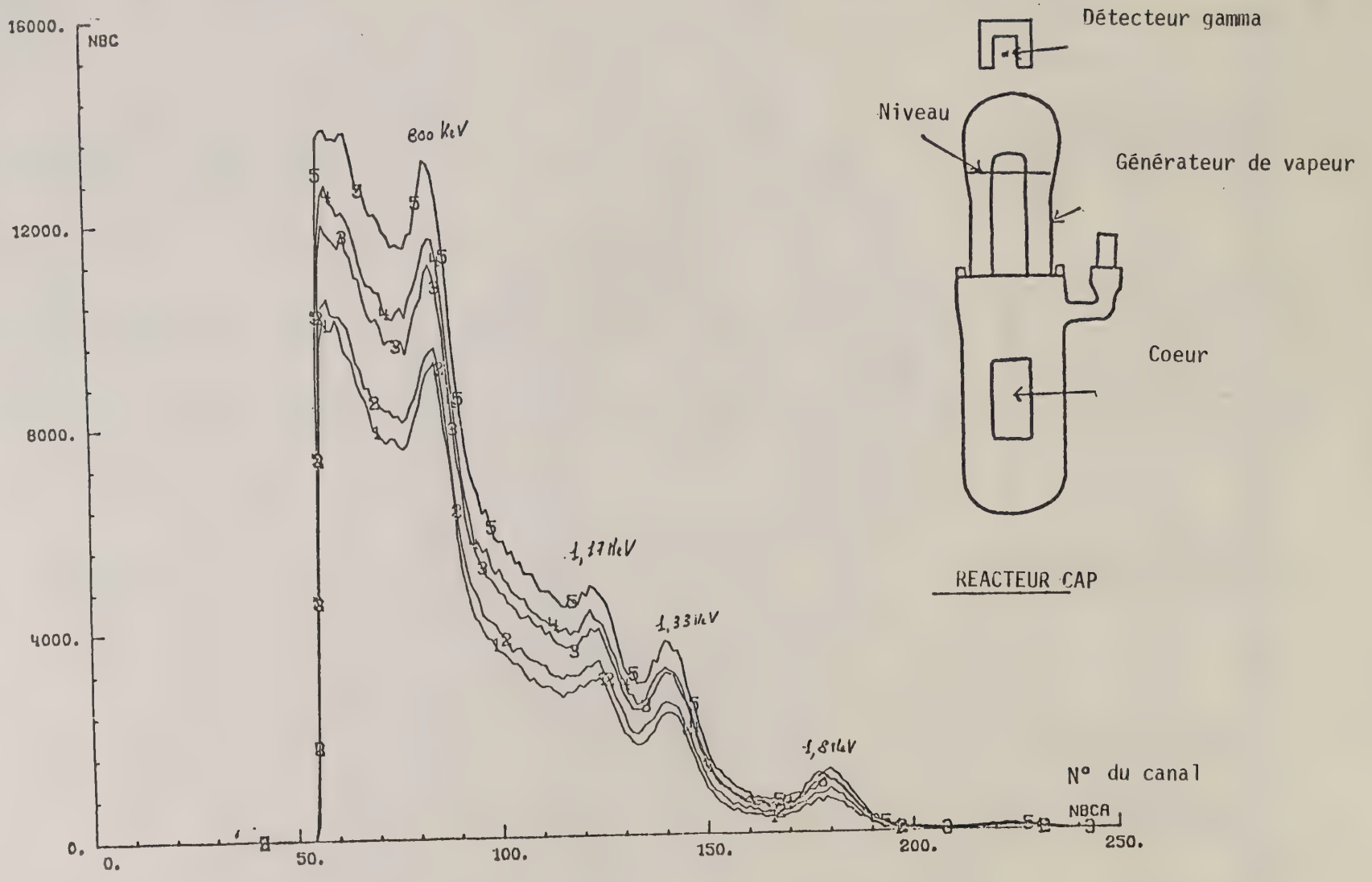


Figure N° 25 : VARIATION DU TAUX DE COMPTAGE POUR DIFFERENTS NIVEAUX REPERES DE 1 à 5

Figure N° 26

Support des tubes guides

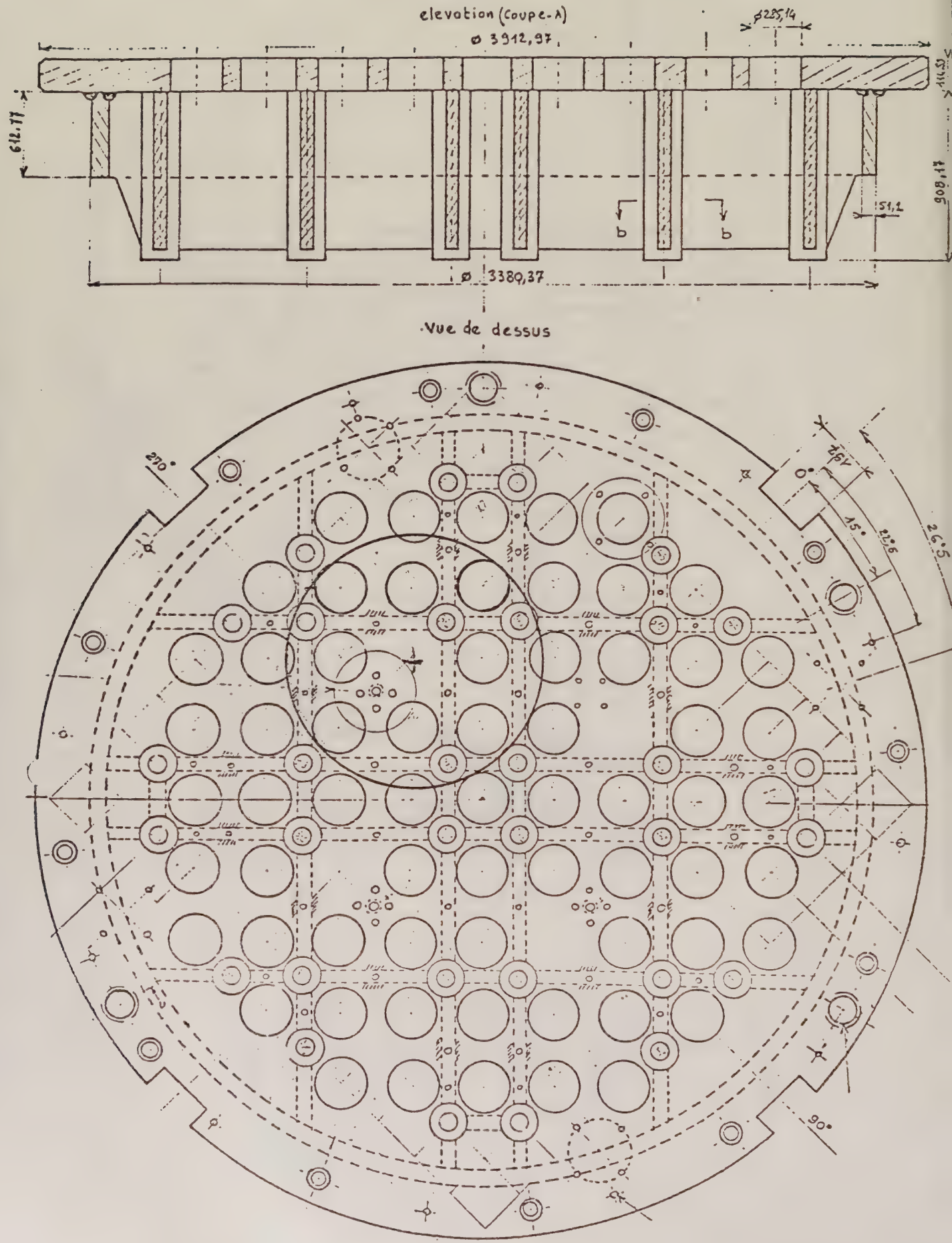
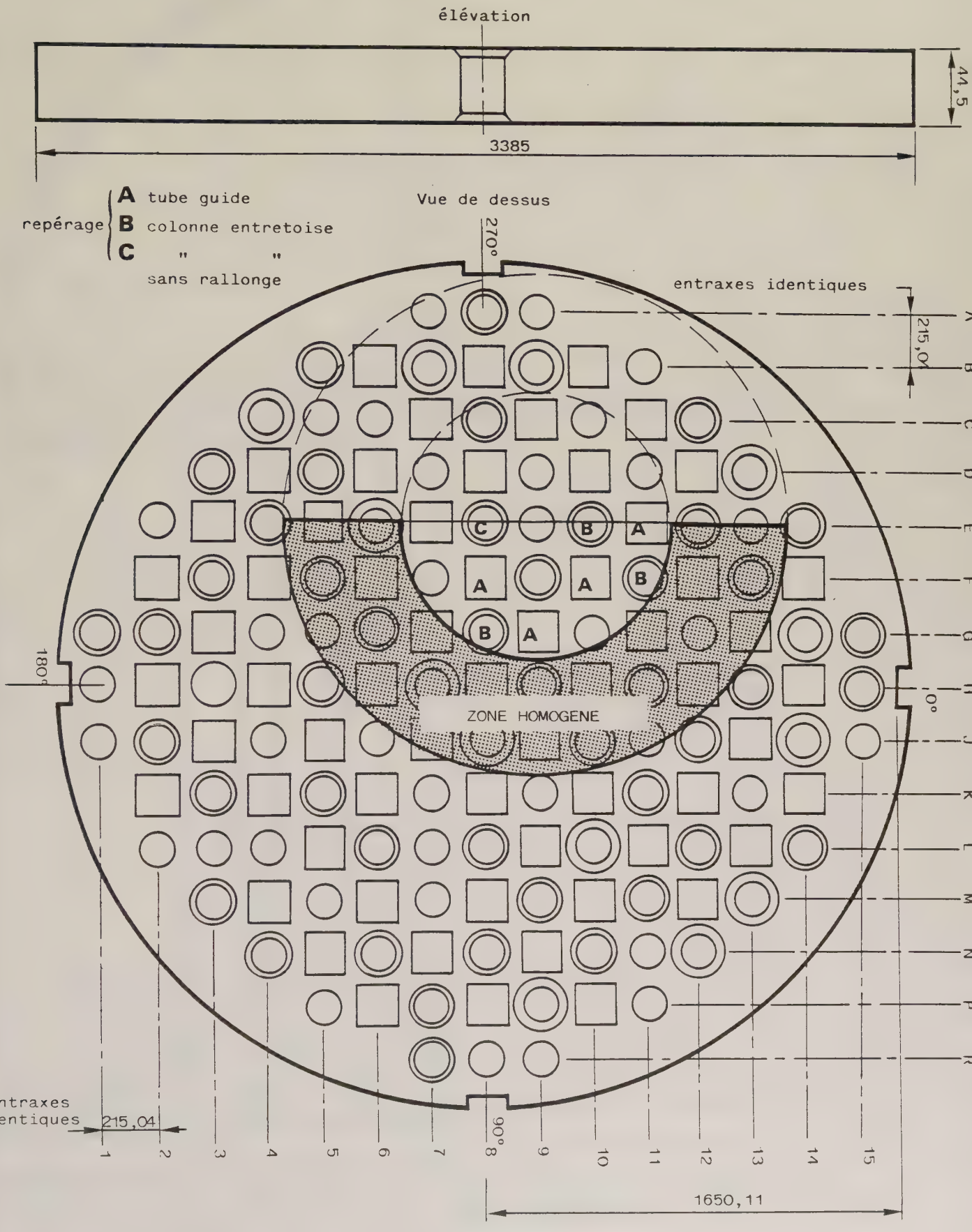


FIGURE 27

PLAQUE SUPERIEURE DE COEUR



F I G U R E 2 8

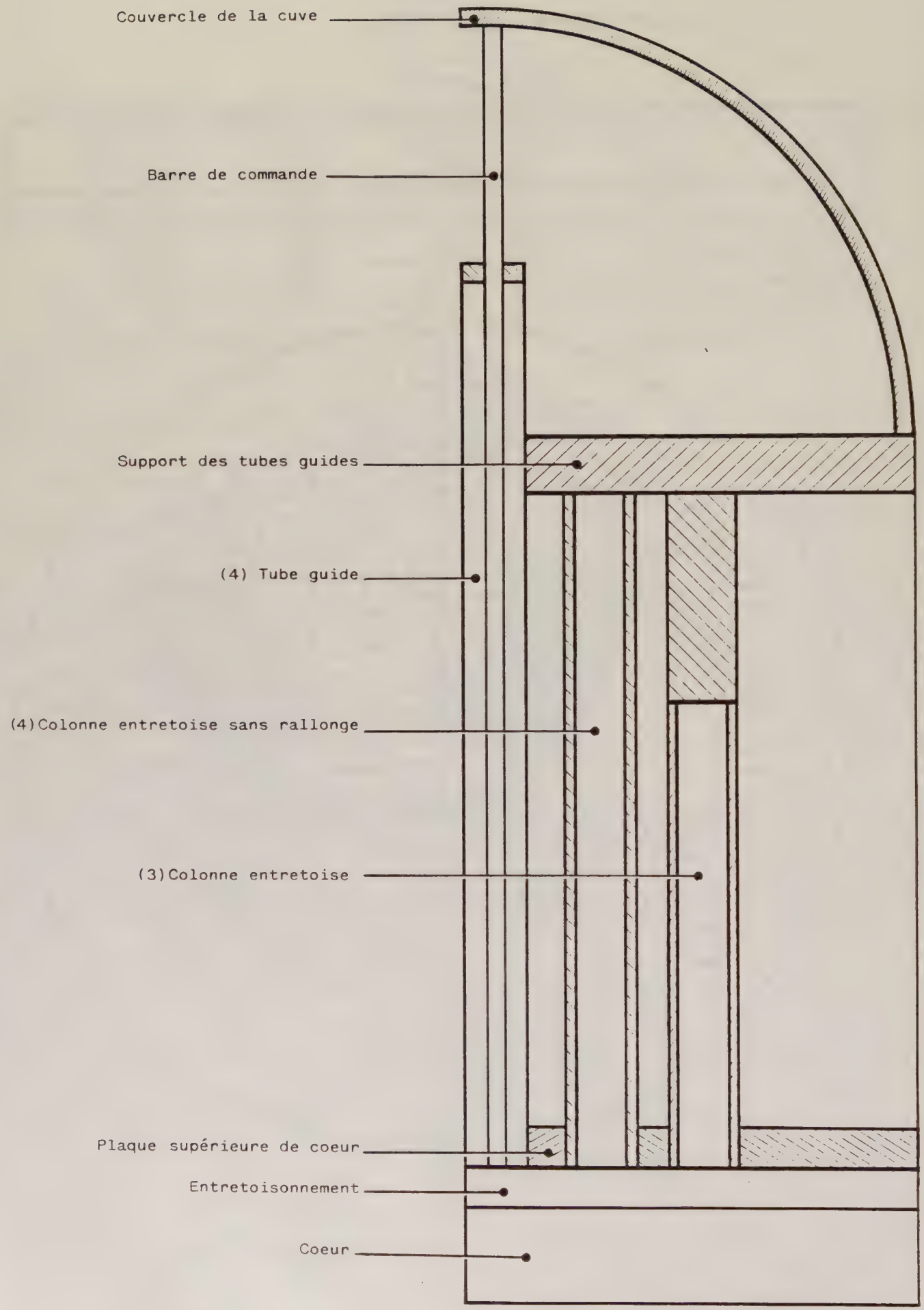
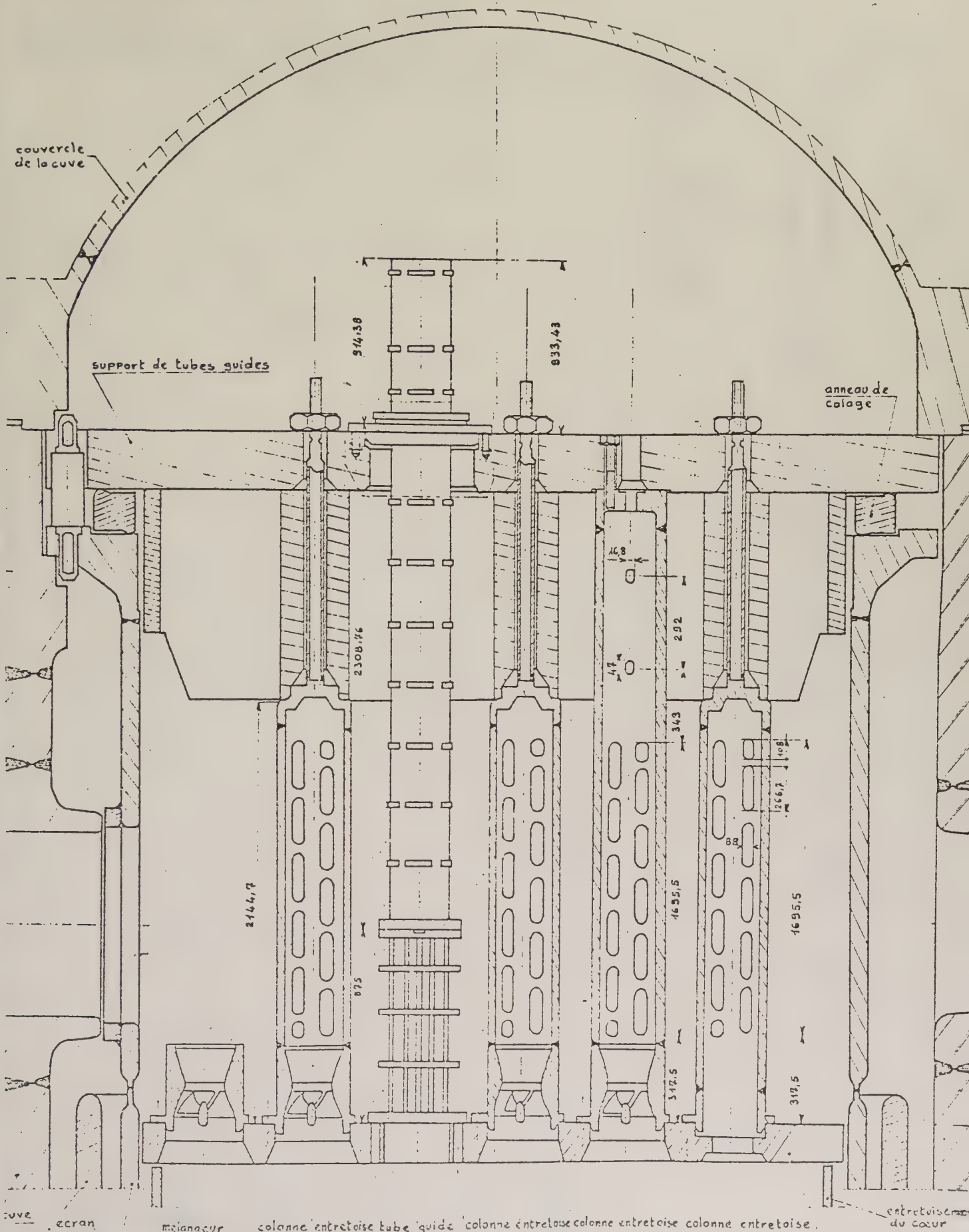

Couvercle de la cuve
Barre de commande
Support des tubes guides
(4) Tube guide
(4)Colonne entretoise sans rallonge
(3)Colonne entretoise
Plaque supérieure de coeur
Entretoisonnement
Coeur

Figure N° 29

Liaisons verticales entre plaque supte de cœur et support de tubes guides



SPECTRE GAMMA DES P.F EN FONCTION DU TEMPS APRES ARRET

NOMBRE DE GAMMA/SECONDE/GROUPE/T. D URANIUM ENRICHISSEMENT 3.25%

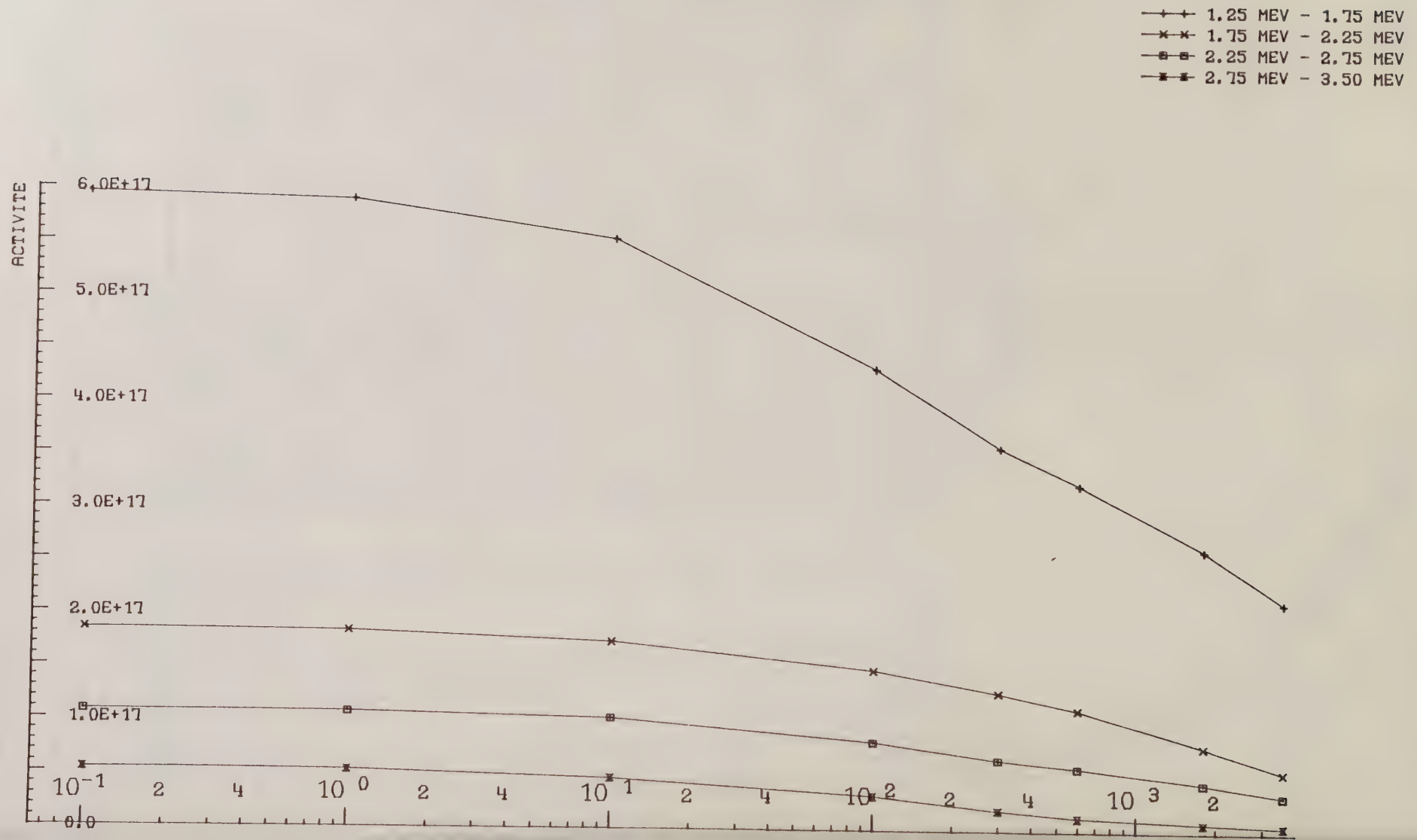


Figure N° 30

Figure N° 31

SPECTRE DES P.F EN FONCTION DU TAUX DE COMBUSTION

NOMBRE DE GAMMA/SECONDE/GROUPE/T. D URANIUM 100 S APRES ARRET

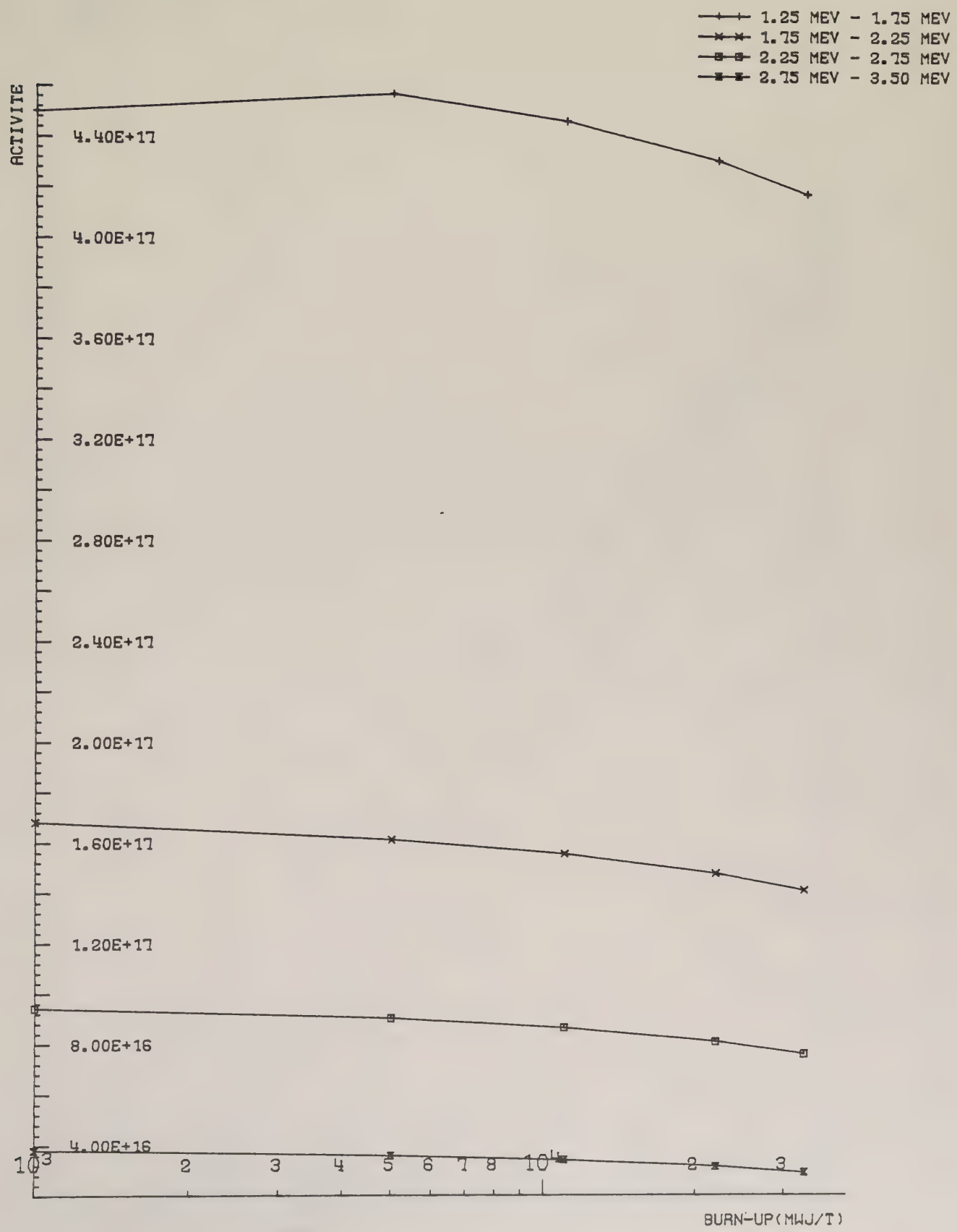
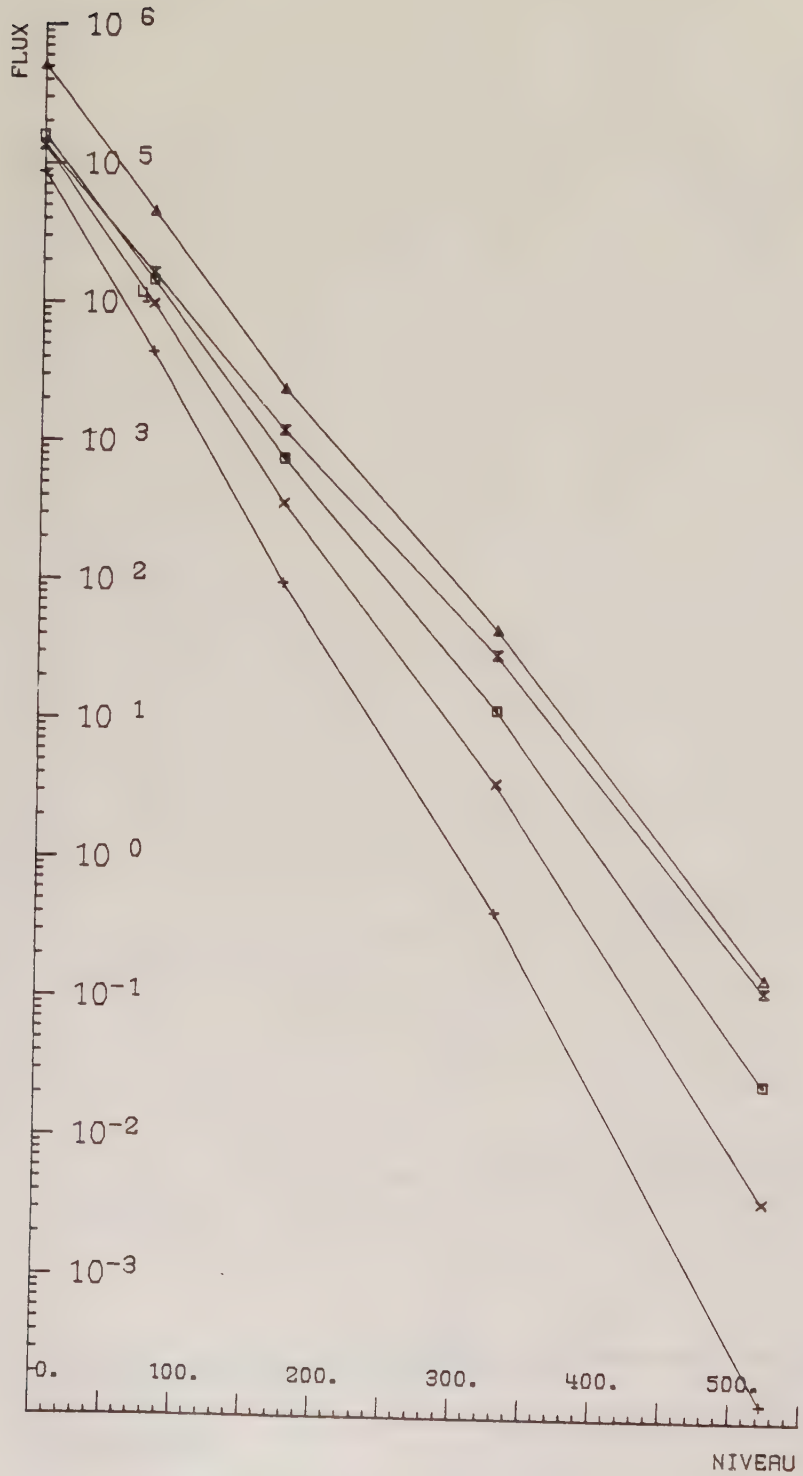


Figure N° 32

FLUX SANS CHOC DU AUX P.F. DU COEUR

100 S. APRES ARRET

GROUPE 1 : 1.25 1.75 MEV
GROUPE 2 : 1.75 2.25 MEV
GROUPE 3 : 2.25 2.75 MEV
GROUPE 4 : 2.75 3.5 MEV
TOTAL : 1.25 3.5 MEV



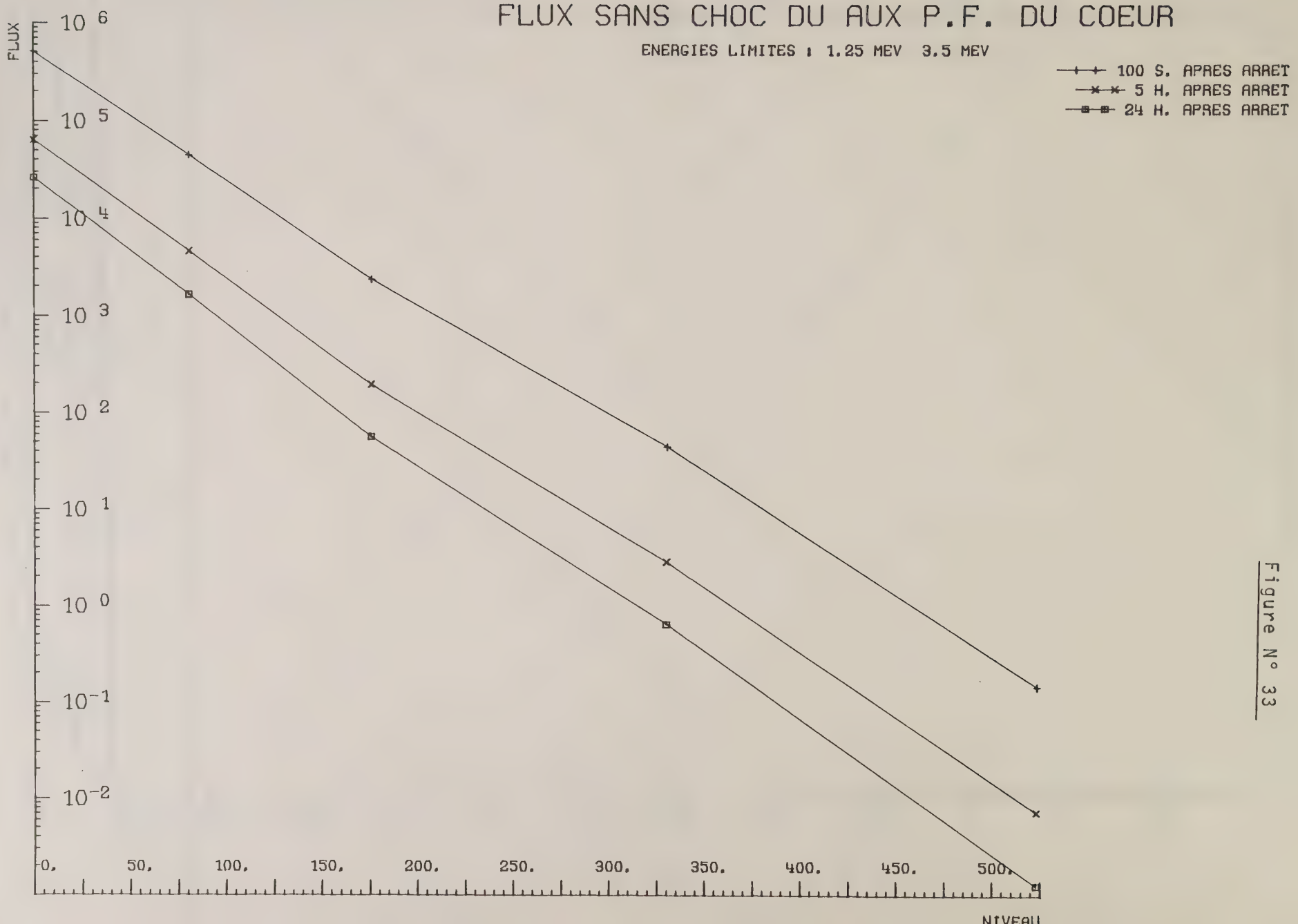

FLUX SANS CHOC DU AUX P.F. DU COEUR
ENERGIES LIMITES : 1.25 MEV 3.5 MEV
100 S. APRES ARRET
5 H. APRES ARRET
24 H. APRES ARRET
FLUX
10 6
10 5
10 4
10 3
10 2
10 1
10 0
10-1
10-2
0.
50.
100.
150.
200.
250.
300.
350.
400.
450.
500.
NIVEAU

Figure N° 33

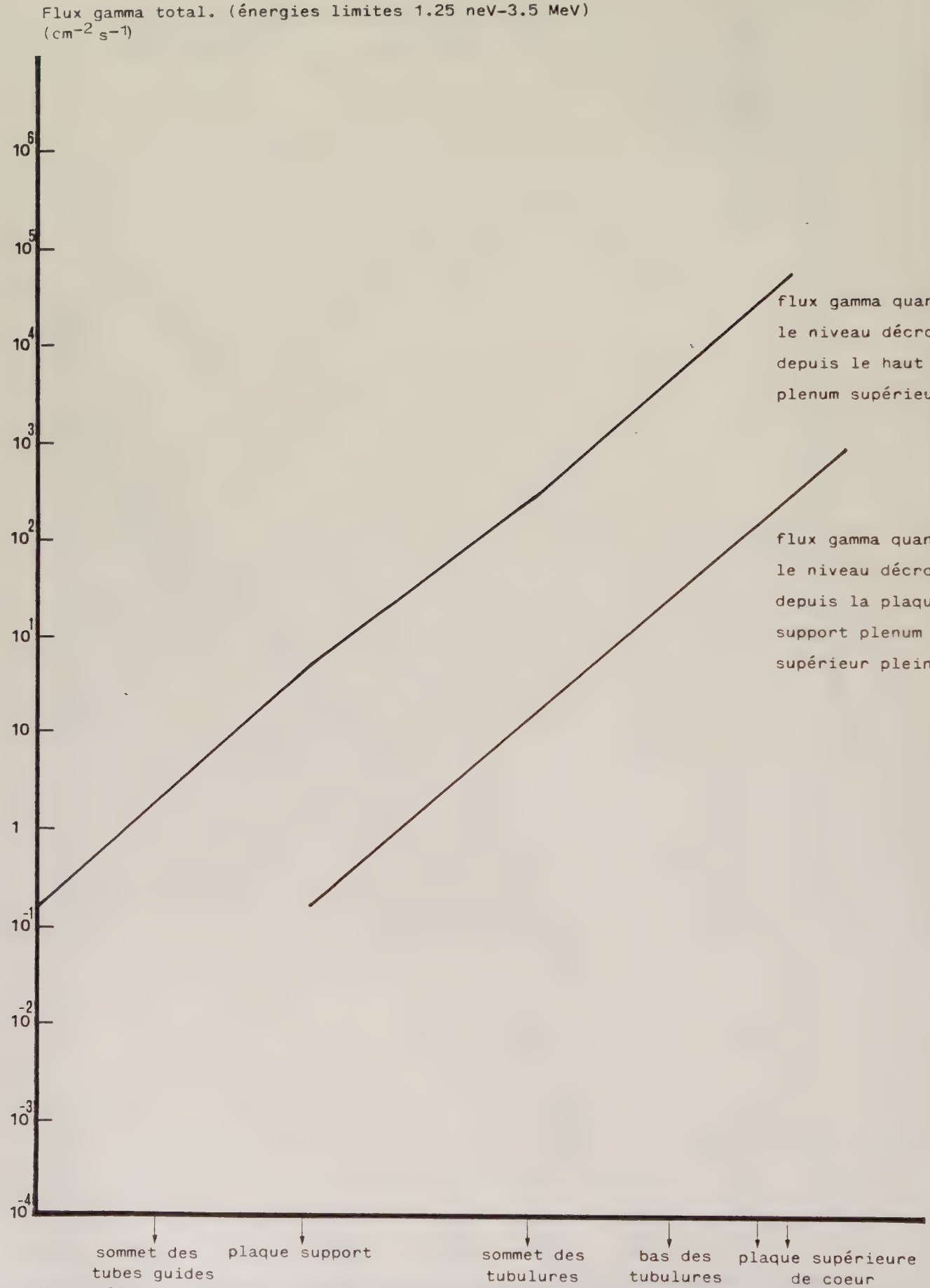


Figure 34 : variation du flux gamma du aux p.f. du coeur en fonction du niveau d'eau, 100 s après arrêt du réacteur. Taux de combustion 22 000 MWJ/T.

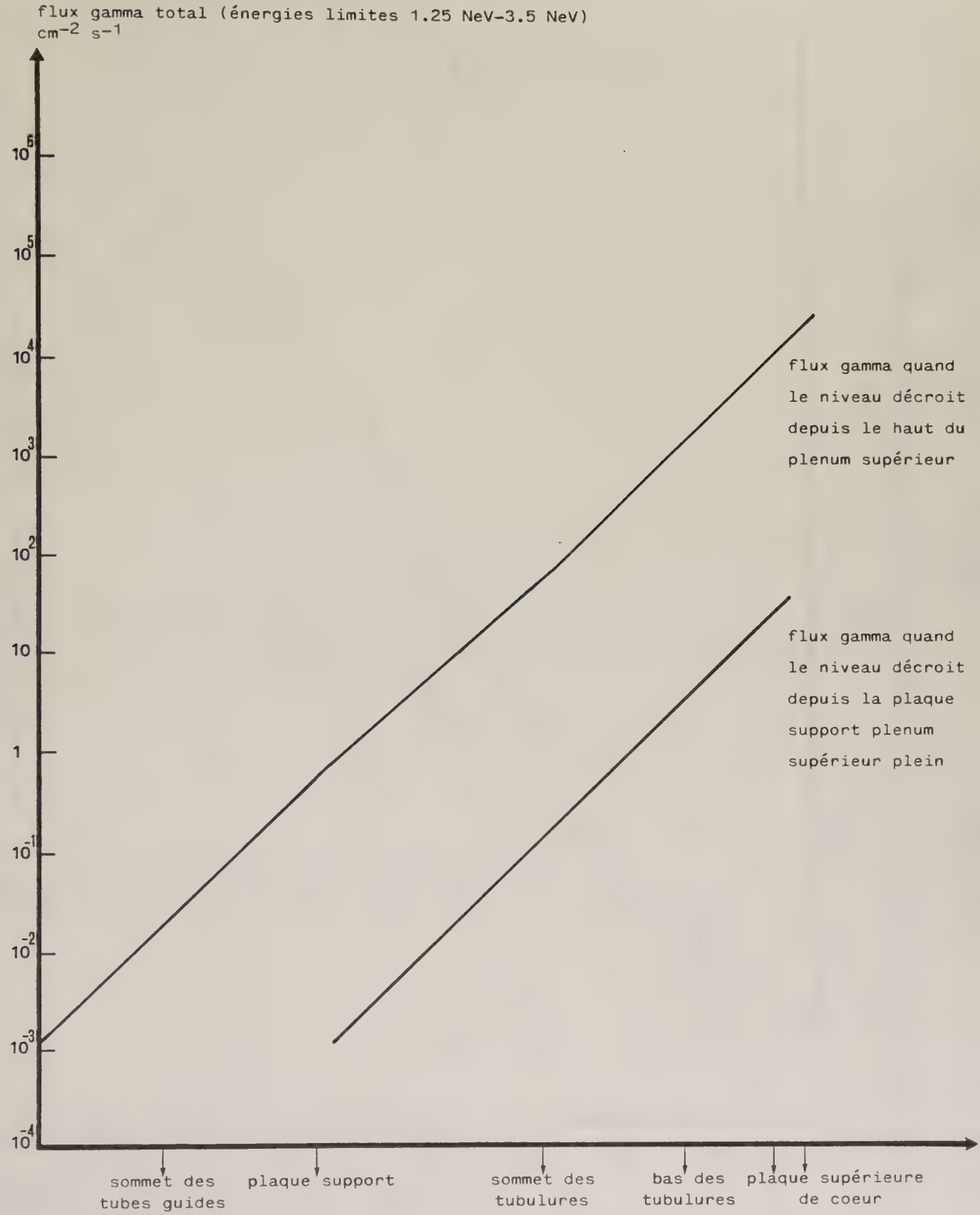


Figure 35 : variation du flux gamma du au p.f. du coeur en fonction du niveau d'eau, 24 h après arrêt du réacteur. Taux de combustion 22 OOONWJ/T

F I G U R E 3 6

Variation du flux Gamma du aux dépôts de produits de corrosion dans le plenum supérieur quand le niveau d'eau décroit depuis le sommet du plenum

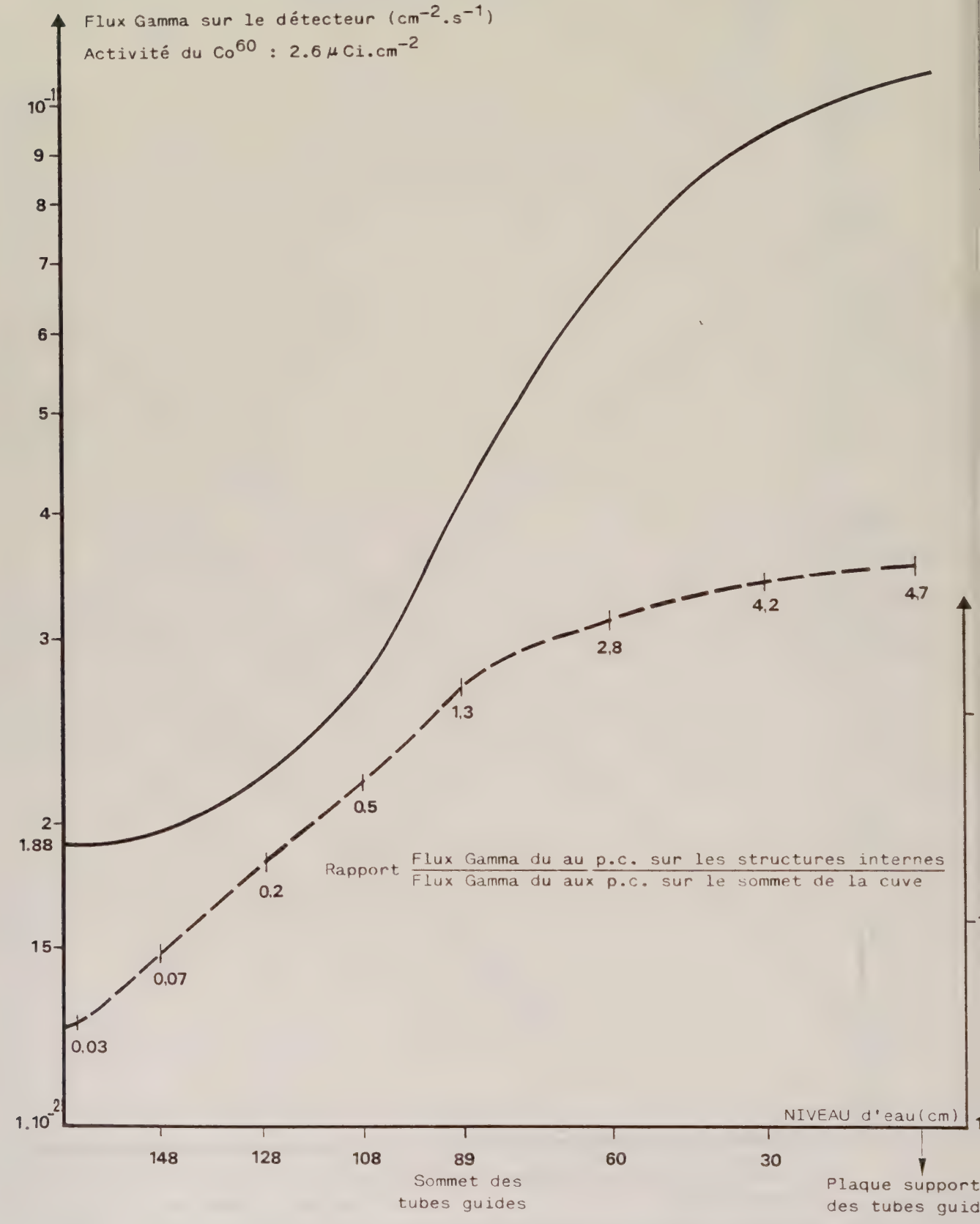


Figure 37 : CONTRIBUTION DES DIFFERENTES SOURCES

le niveau décroit depuis le haut du plenum supérieur
énergies limites : 1.25 MeV - 3.5 MeV

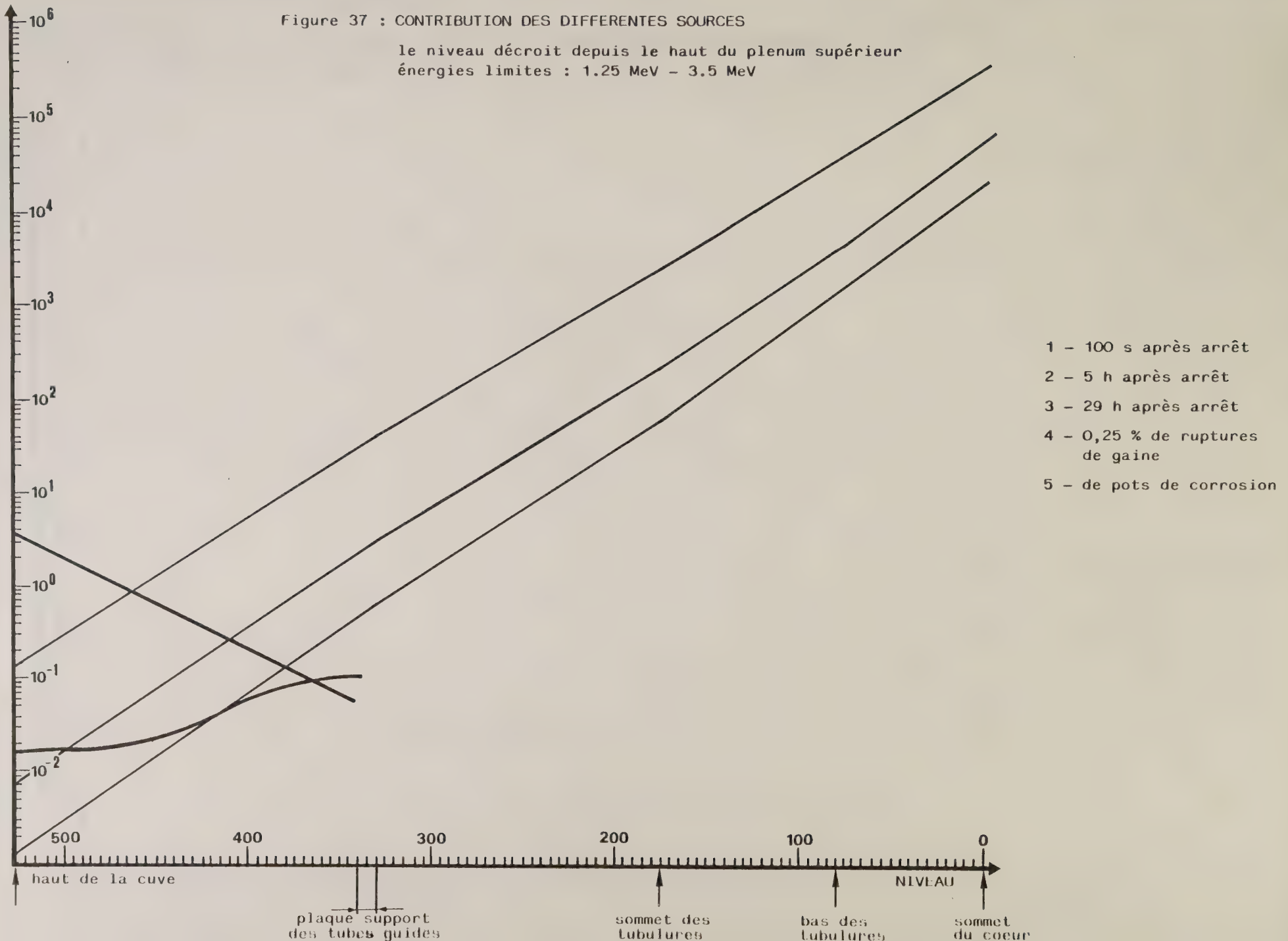
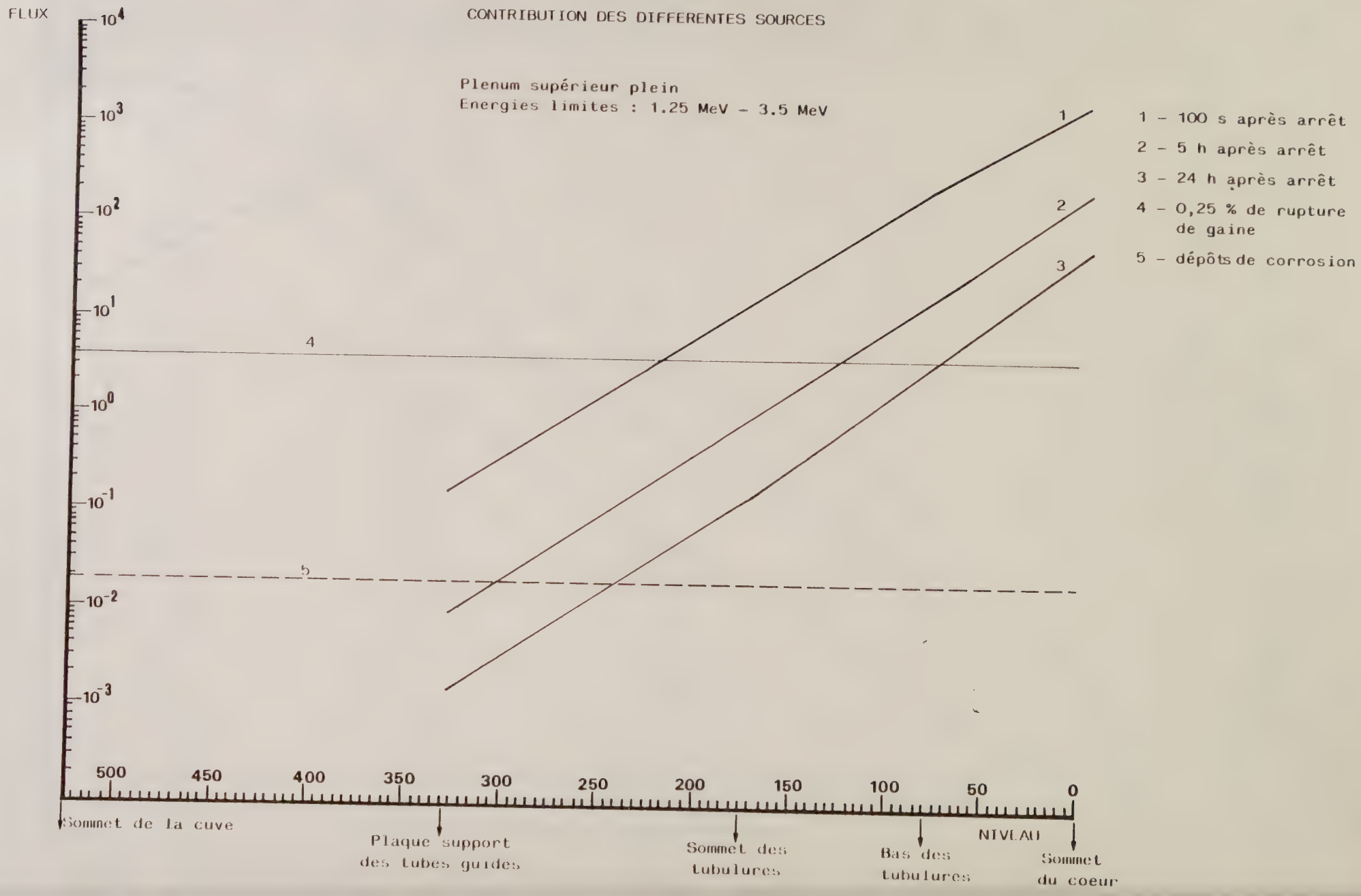


FIGURE 38

CONTRIBUTION DES DIFFERENTES SOURCES



F I G U R E 3 9

Flux du aux ruptures de gaine/flux du aux P.F. du coeur au niveau du sommet des nozzles
en fonction du temps après arrêt du réacteur

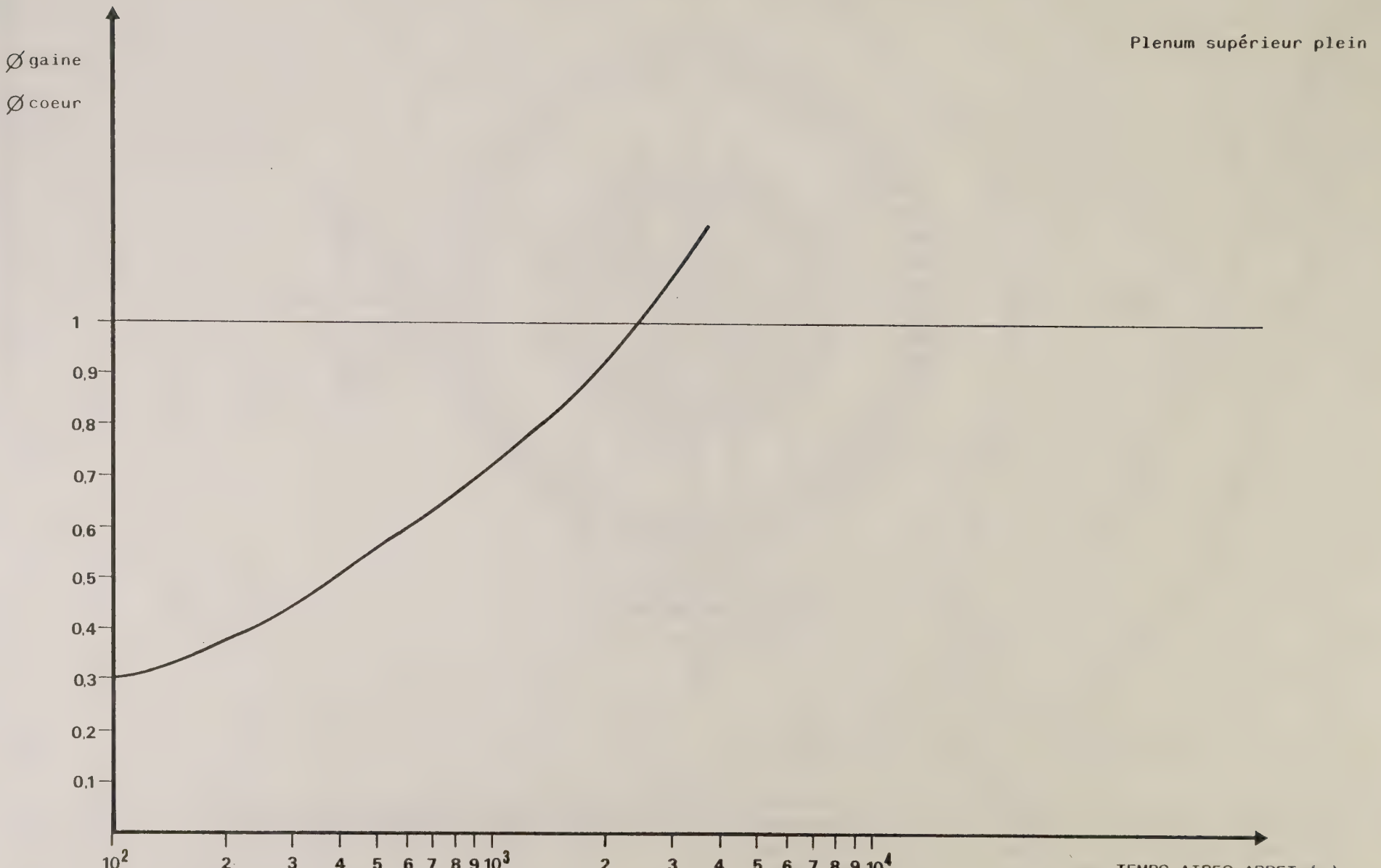
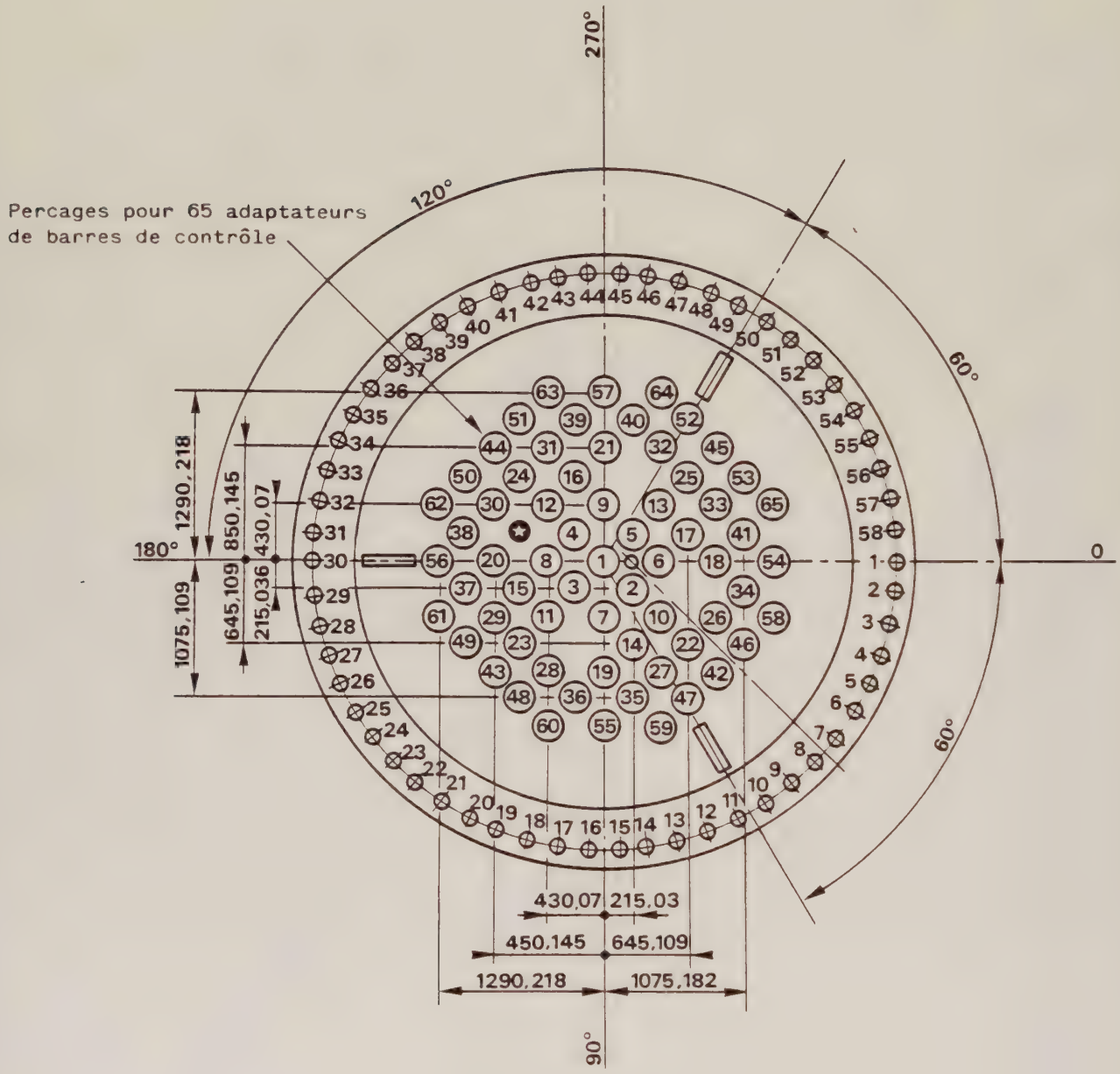


FIGURE 40

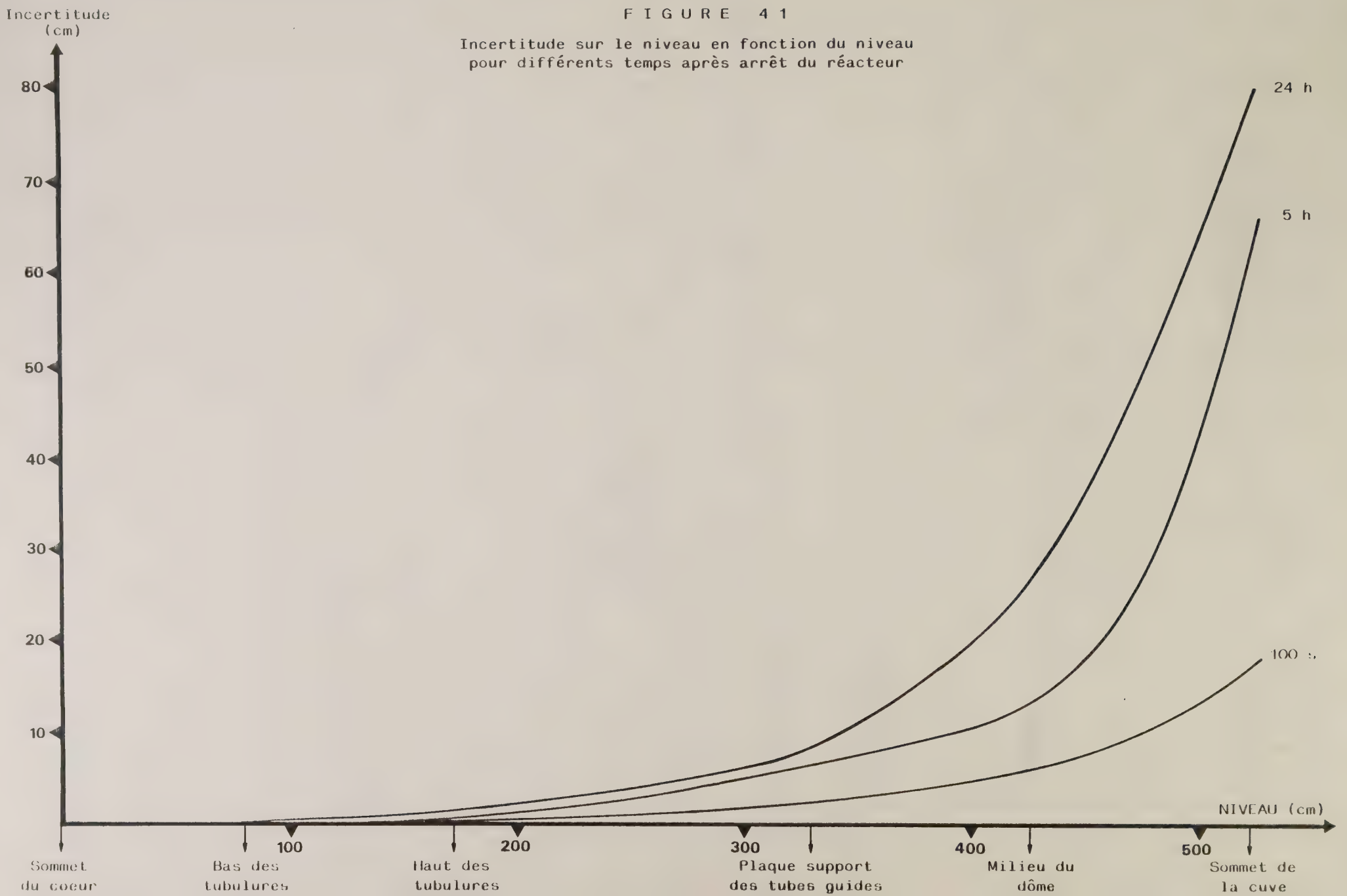
VUE DE DESSUS DU COUVERCLE



Emplacement du détecteur

F I G U R E 4 1

Incertitude sur le niveau en fonction du niveau
pour différents temps après arrêt du réacteur



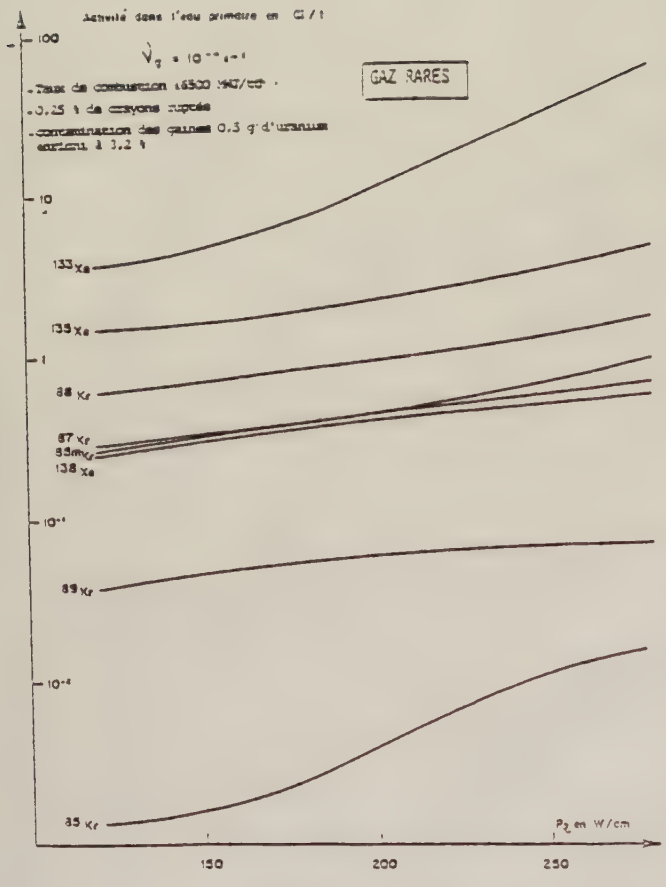


Figure N° 42a

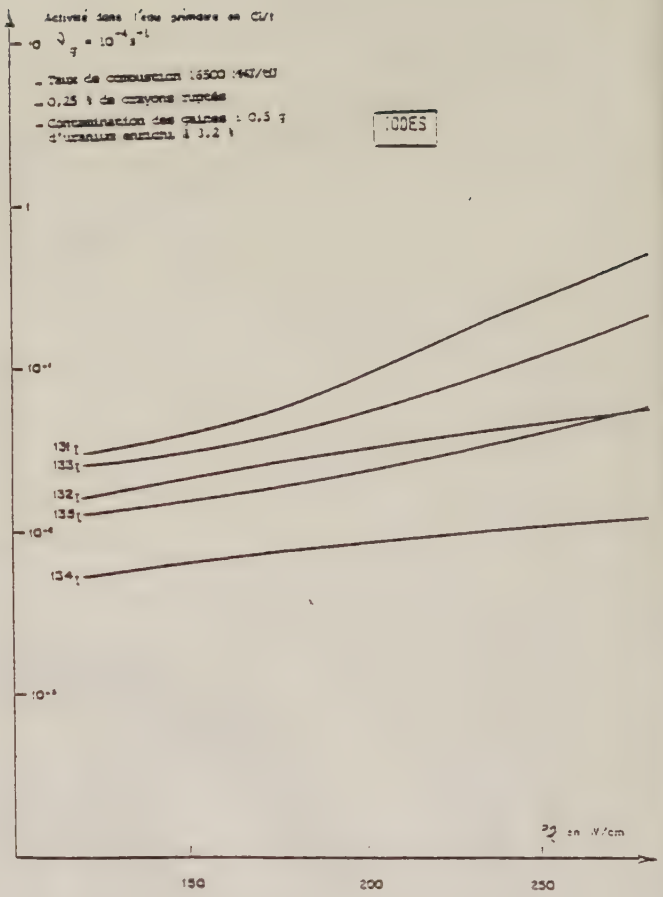


Figure N° 42b

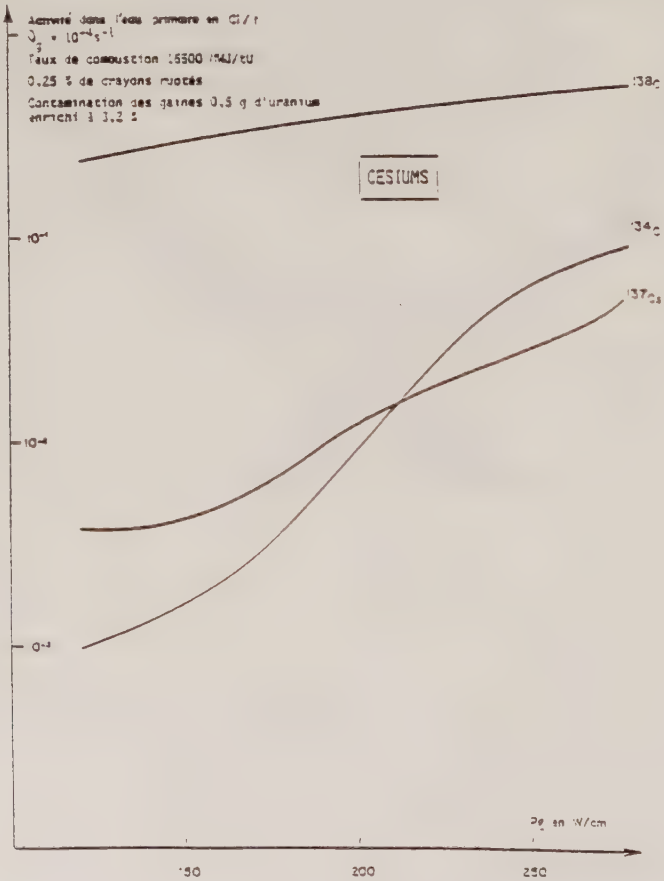


Figure N° 42c

Figure N° 42

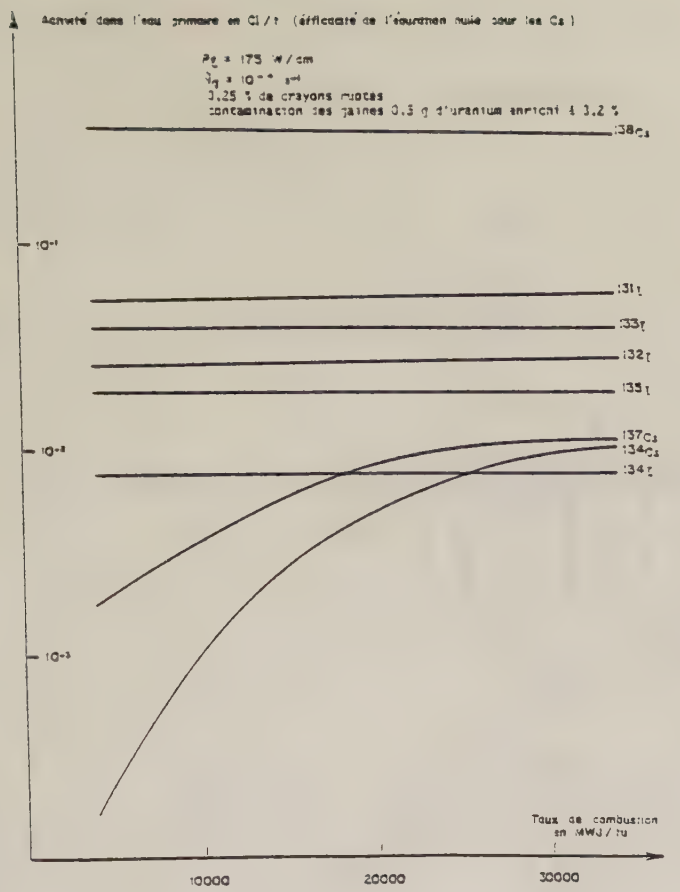


Figure N° 43a

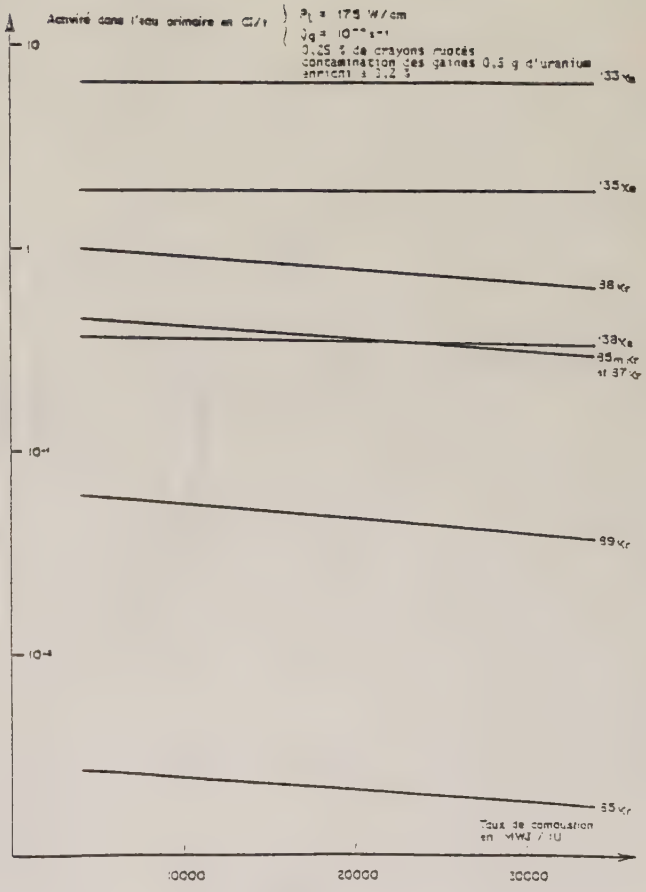


Figure N° 43b

Figure N° 43

FIGURE 44

DISPOSITION 2

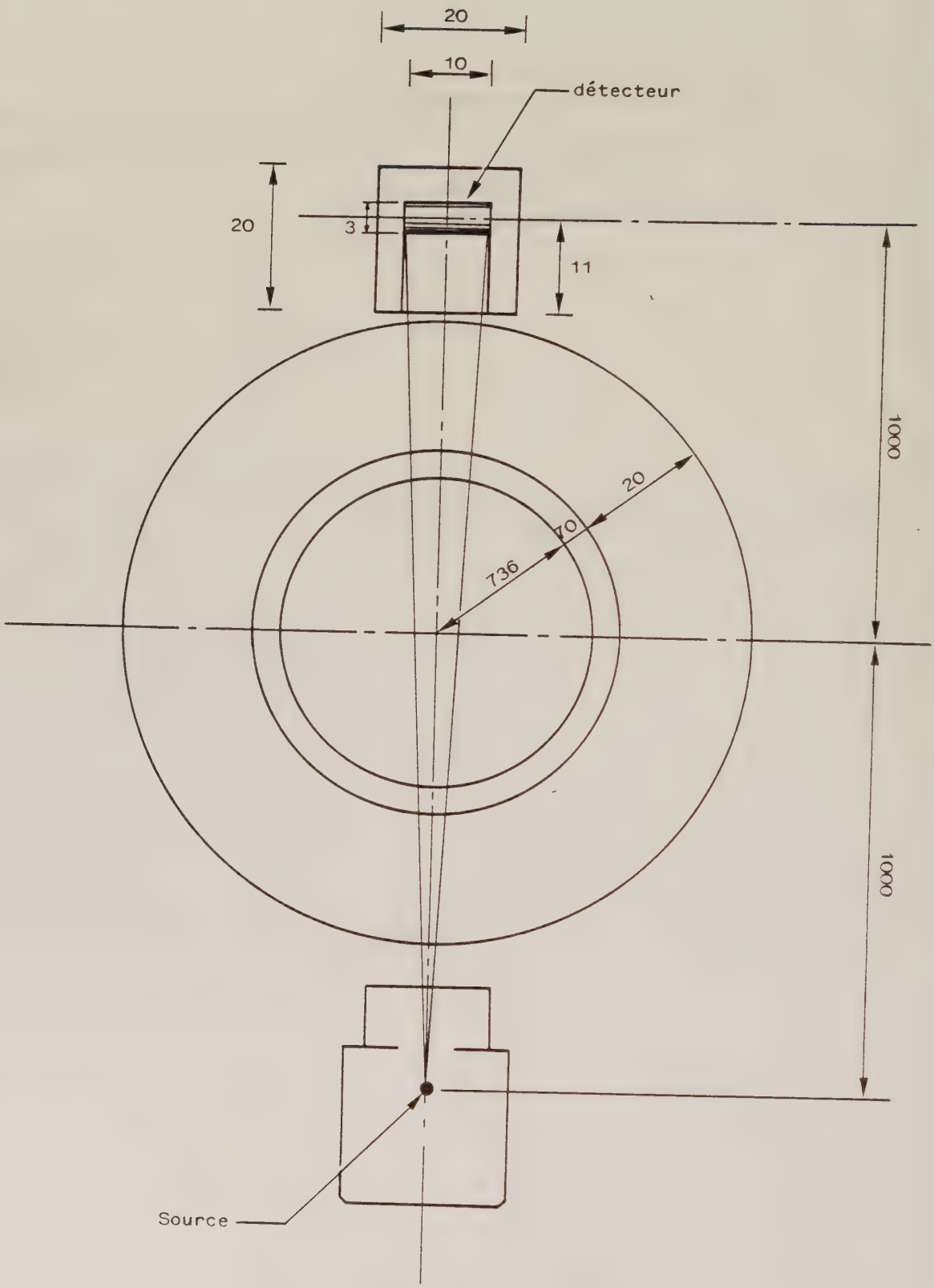
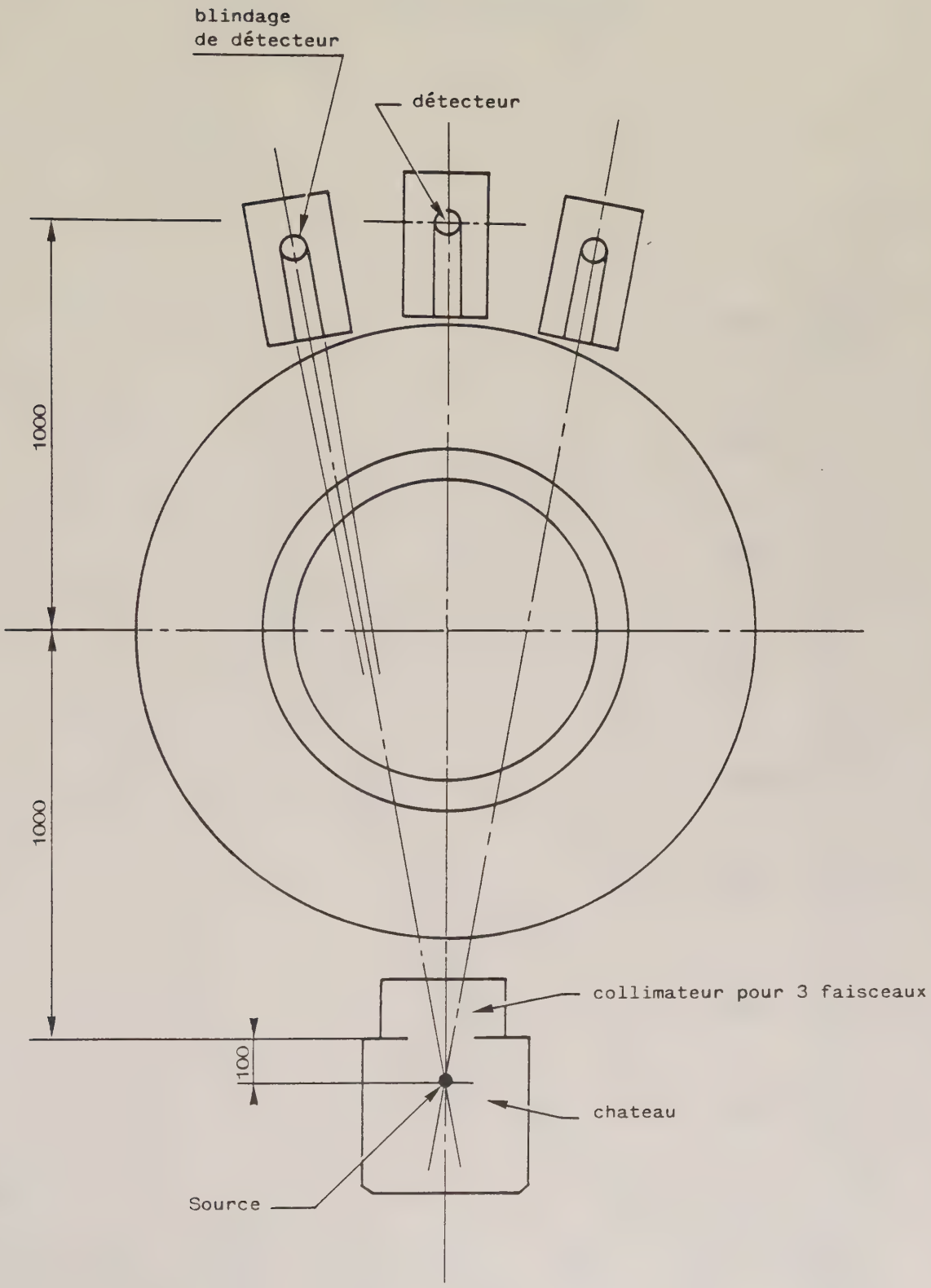


FIGURE 45


blindage
de détecteur
détecteur
1000
1000
100
collimateur pour 3 faisceaux
chateau
Source

TAUX DE COMPTAGE EN FONCTION DU TAUX DE VIDE

SOURCE 500CI DE CO 60. SENSIBILITE DU DETECTEUR : 1COUP/GAMMA CM-2 S-1

—+—+— TSAT(118BARS) = 323.36 C

—×—×— TSAT(65BARS) = 280.82 C

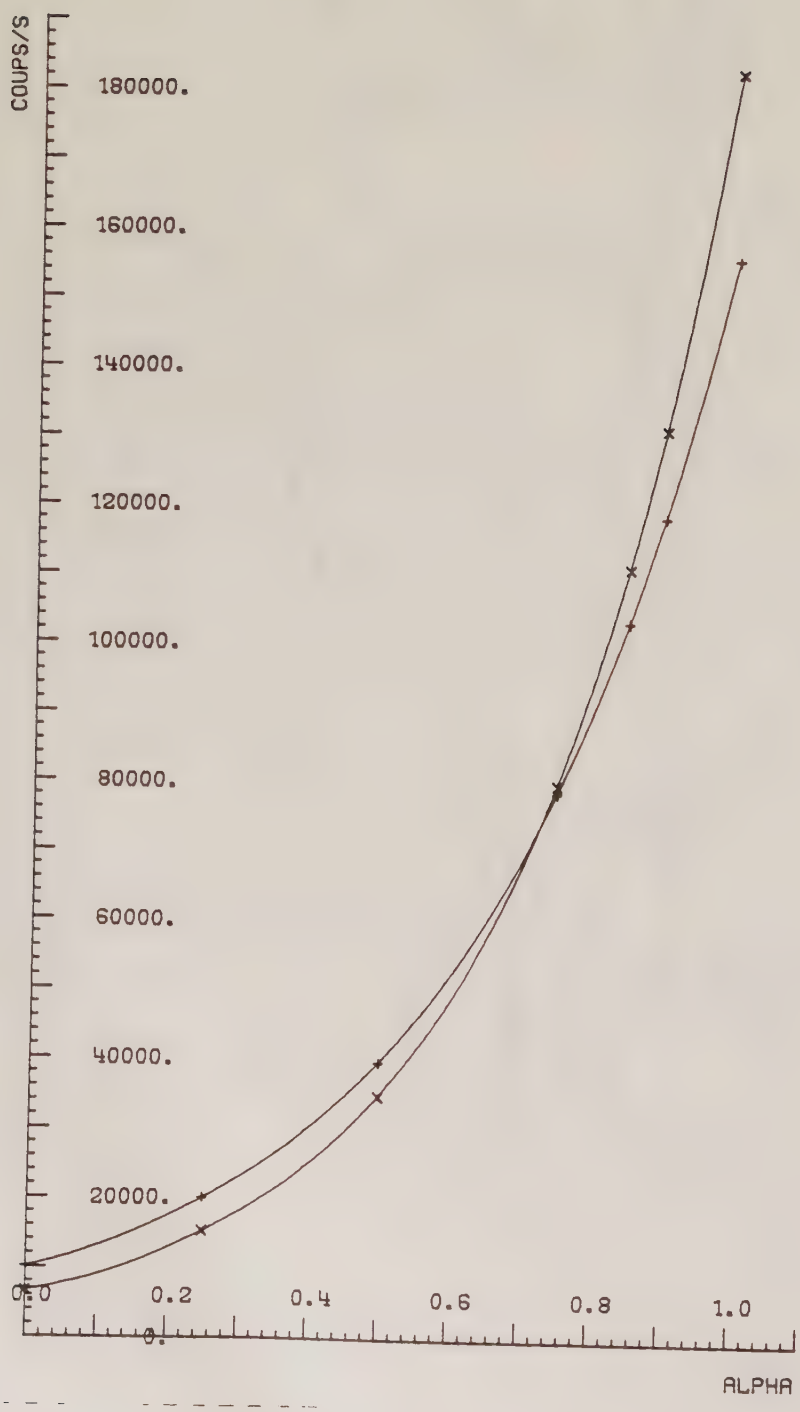


Figure N° 46

SENSIBILITE EN FONCTION DU TAUX DE VIDE

SOURCE 500CI DE CO 60. P = 95 %

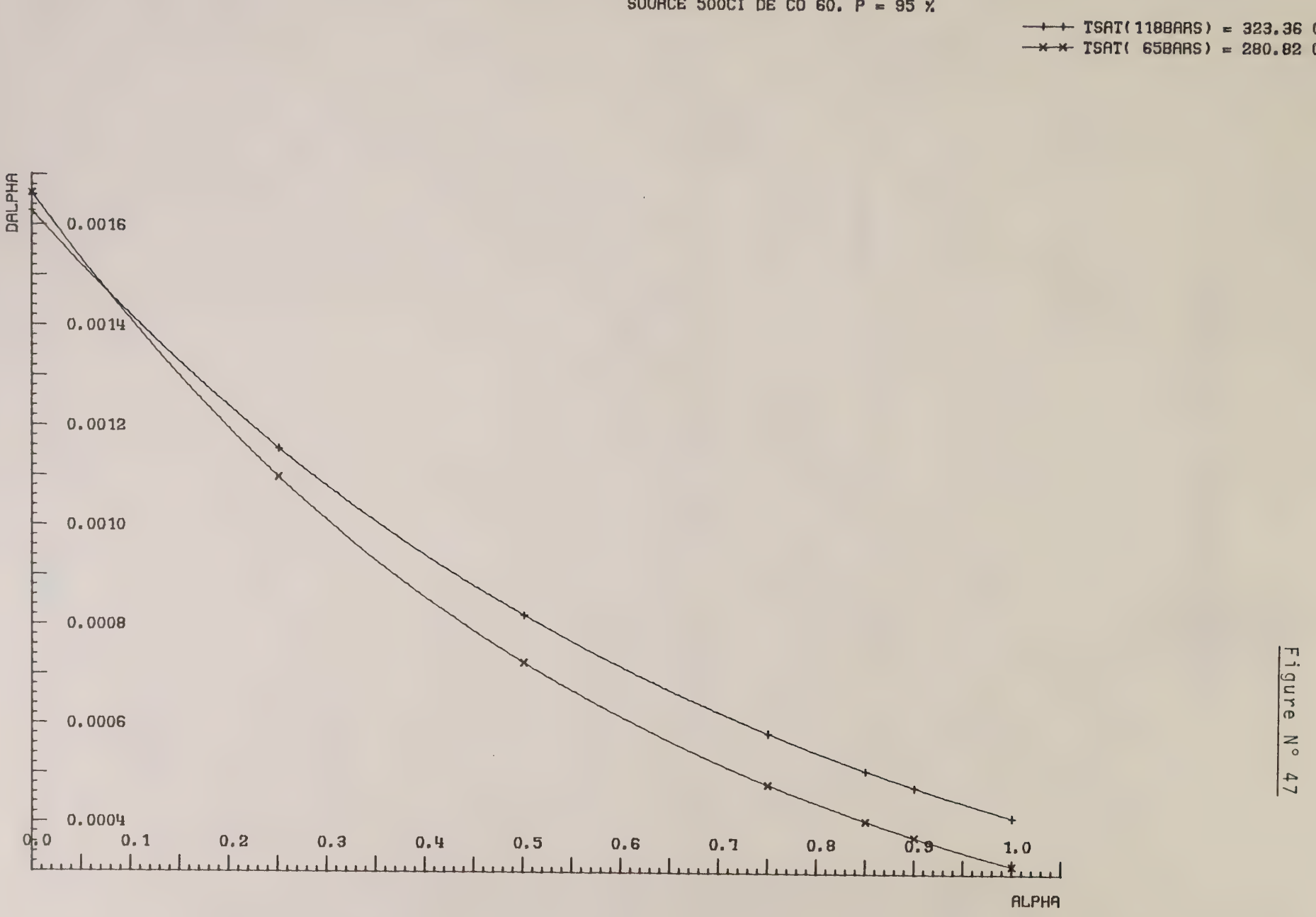


Figure N° 47

TEMPS DE MESURE EN FONCTION DU COMPTAGE DES P.F

SOURCE 500CI DE CO 60. DISTANCE SOURCE DETECTEUR 2 METRES.

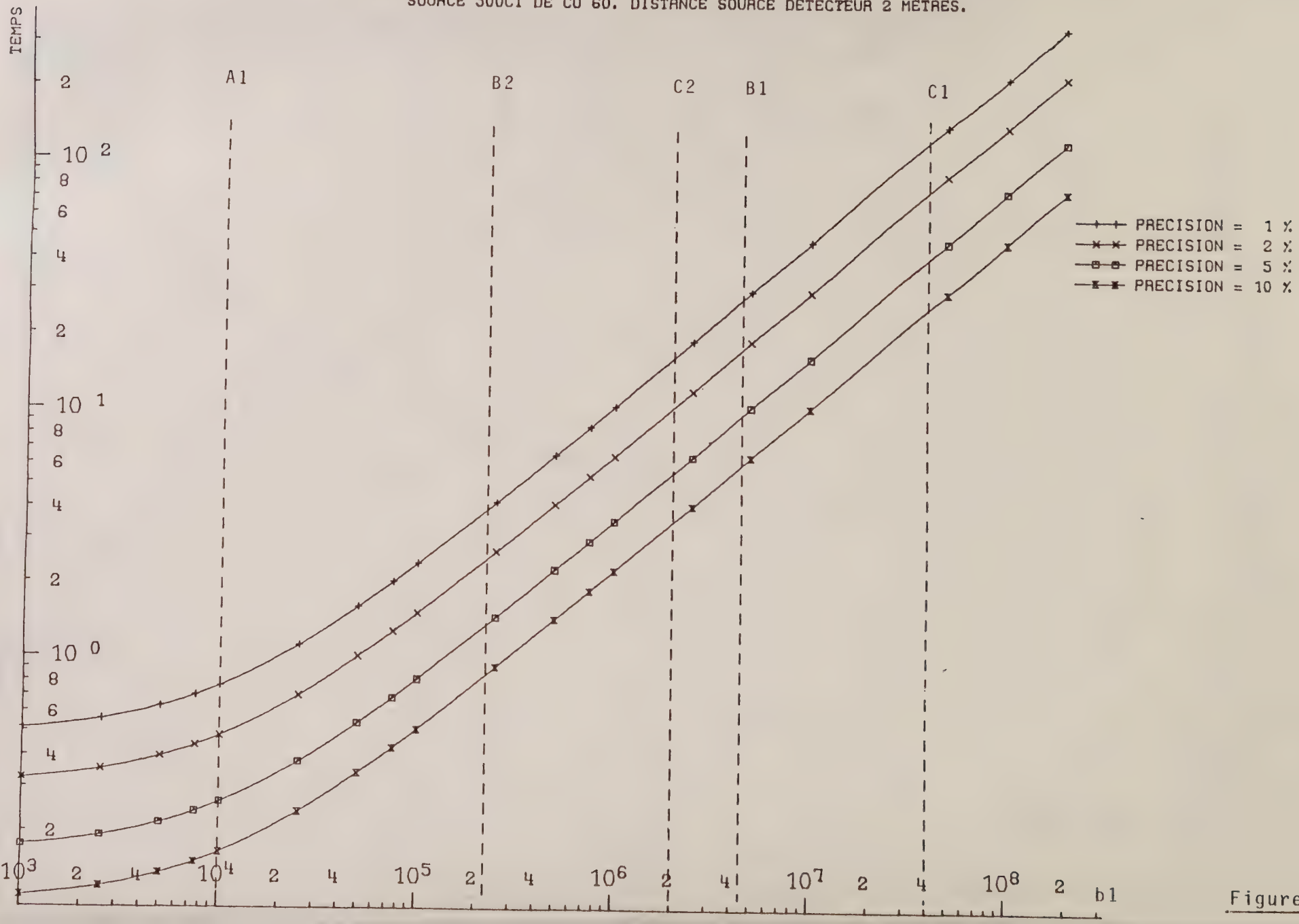


Figure N° 48

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

3200

PERMIS D'IMPRIMER

Doctorat 3° CYCLE

Thèse de ENERGETIQUE

Nom ROMEYER-DHERBEY

Prénoms Jacques.

Date et lieu de naissance 29 octobre 1953 à CARPENTRAS (Vaucluse)

SUJET :

Thèse : Application de méthodes radioactives à l'instrumentation des réacteurs à eau sous pression.

Vu et approuvé :

Orsay, le 20 avril 1982

Les Membres du Jury.

P. Bernard

Ce document doit être remis à l'étudiant à l'issue de la soutenance.

Imprimé par le Bureau de Documentation du CEN/CADARACHE